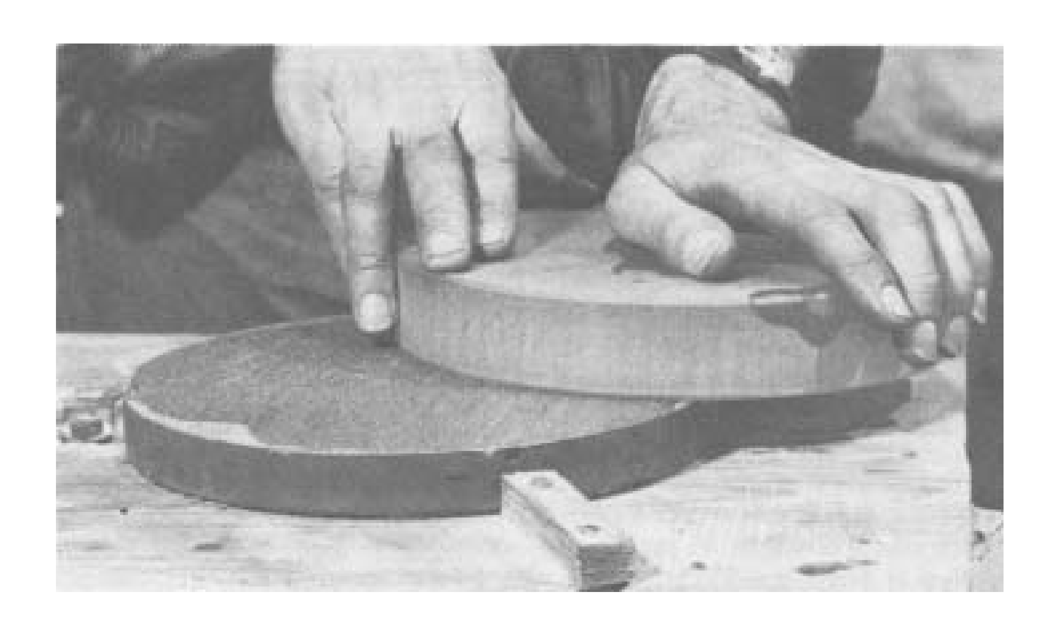
EL TELESCOPIO DEL AFICIONADO

cómo se construye

Jean Texereau



Nombre original de la obra en Francés:
Construction du Télescope d'amateur
Nombre de la obra en Inglés:
How to make a telescope

INDICE

Este libro fue editado por nosotros
Con mucho cariño para el Planetario de la USACH.

1.Consideraciones generales y proyecto

1.1 Insuficiencia de la óptica geométrica para la correcta concepción del instrumento astronómico

El lector está más o menos familiarizado con las figuras de los cursos elementales de física y obras de divulgación, donde al definir un telescopio se ven los rayos paralelos de luz provenientes de una fuente supuesta en el infinito, converger en un foco después del paso a través de un objetivo refractor o de la reflexión sobre un espejo (objetivo reflector), mostrando así claramente, la formación de la imagen. Esta imagen es luego examinada con una especie de lupa compuesta que constituye el ocular.

Por lo general no se insiste suficientemente sobre la importancia relativa de estos dos elementos. Todas las esperanzas del astrónomo están puestas en el tamaño y la calidad de su objetivo; aun en el instrumento más pequeño, por sus dimensiones, por las condiciones severas que debe cumplir, por las dificultades que implica su construcción, eclipsa completamente al ocular.

En los grandes y modernos telescopios fotográficos se utiliza directamente la imagen focal del espejo principal sin ningún intermediario, como es el caso del telescopio Hubble colocado en órbita. ¡Es maravilloso impulsar así nuestros sondeos astronómicos hasta el límite extremo con la ayuda de una sola superficie óptica!

Podría creerse, examinando las figuras en que los rayos luminosos están representados por rectas, que el aumento del diámetro del objetivo sirve únicamente para reunir más luz y por lo tanto para revelar estrellas más débiles; esto es cierto pero no es solamente eso.

Si las condiciones geométricas ideales fueran satisfechas, se tendrían en el foco imágenes de estrellas en el sentido matemático del término y siempre sería posible desdoblar el par estelar más cerrado aún con el objetivo más modesto, puesto que en su plano focal podrían aplicarse sin inconvenientes los aumentos más elevados.

En efecto en otros tiempos se creía que la perfección de las imágenes dependía exclusivamente de la calidad del trabajo del “artista” que había tallado el objetivo. Se sabe ahora que existe un límite que ninguna destreza humana podría cambiar y ese límite está compuesto por la naturaleza misma de los rayos luminosos que, en realidad, no se propagan rigurosamente en línea recta. A partir de cierta precisión no se gana casi nada perfeccionando la forma de un objetivo dado.

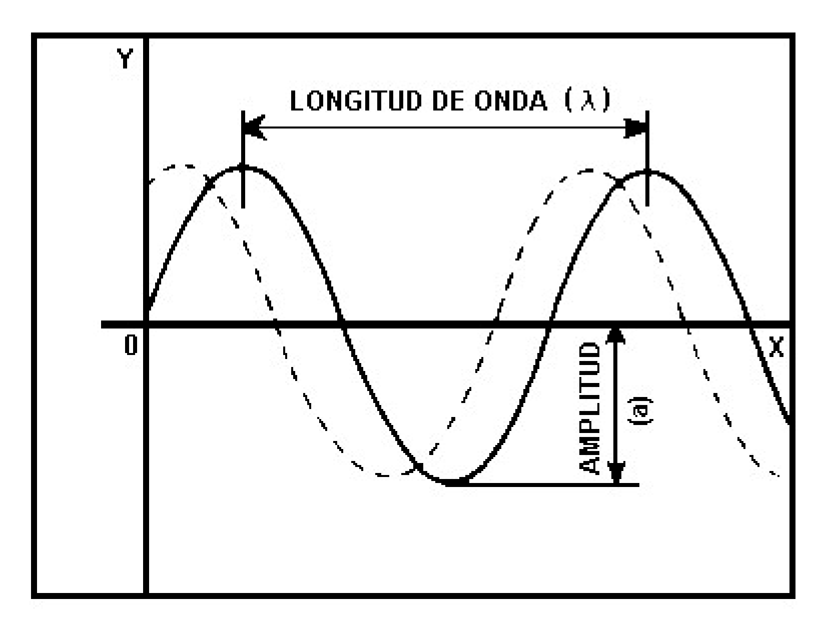


Fig 1. Movimiento sinusoidal

La óptica geométrica sólo constituye, pues, una primera aproximación, insuficiente para el óptico práctico que debe saber con qué precisión debe construir su objetivo y también para el usuario, que debe conocer la pequeñez de los detalles accesibles a su instrumento. La óptica llamada física significa una segunda aproximación capaz de proporcionar estos informes, lo cual no significa, desde luego, que explique todo.

1.2 Un poco de óptica Física

Ciertos fenómenos físicos como la difracción de la luz y las interferencias luminosas, sólo se explican admitiendo que la luz está constituida por alguna cosa que vibra en forma sinusoidal, con cierta amplitud, cierta longitud de onda característica y con frecuencia prodigiosa, puesto que en un segundo tiene tiempo para recorrer cerca de 300.000 Km siguiendo las innumerables sinusoidales comprendidas en esta distancia a razón de aproximadamente 2.000 por milímetro.

Los matemáticos designan la amplitud de las vibraciones con una **“a”**, su longitud de onda con λ y representan esa “alguna cosa” por un vector o por una línea sinuosa (fig. 1) que evidentemente no tiene ninguna relación con la realidad física que excede nuestra comprensión, pero que muestra cómodamente una o más particularidades interesantes de su movimiento.

Dos vibraciones luminosas de la misma amplitud y longitud de onda, que vibran sincrónicamente según una dirección idéntica no están necesariamente confundidas (fig. 1, línea llena y línea punteada) si la segunda por ejemplo, ha debido recorrer un camino óptico suplementario que difiere en un número no entero de longitudes de onda, se dice que existe una *diferencia de fase* y dadas estas condiciones ambos rayos pueden interferir y aun destruirse completamente si el desfasamiento es exactamente igual a media longitud de

onda. Fresnel fue el primero en decir que la luz sumada a la luz puede algunas veces dar oscuridad. Supongamos una fuente luminosa que irradie en todas direcciones dentro de un medio ópticamente homogéneo; todos los puntos que se encuentren a la misma distancia de la fuente están en fase naturalmente; la superficie que pasa por todos estos puntos se denomina: *superficie de onda;* en el medio homogéneo supuesto, tal superficie sólo puede ser esférica, o plana en el límite si está muy alejada de la fuente.

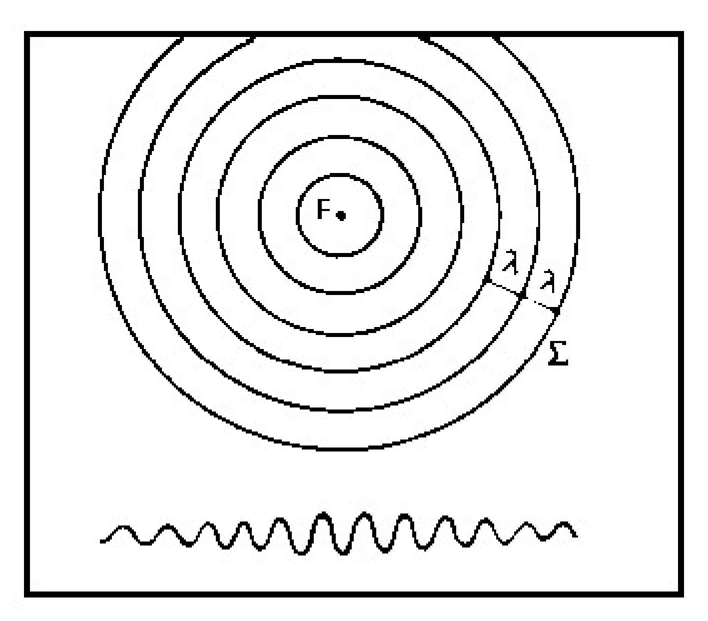


Fig. 2 Vibración ondulatoria

Una imagen de la vibración ondulatoria se obtiene arrojando una piedra en el agua; en el punto S hay emisión de un sistema de ondas de amplitudes decrecientes pero cuya longitud de onda permanece constante (fig. 2).

1.3 Definición del objetivo perfecto

El objetivo debe dar una imagen físicamente perfecta de una fuente luminosa situada sobre su eje y en el infinito. Las sumarias definiciones procedentes nos ayudarán a comprender qué debe entenderse por aquello. Puesto que la fuente está muy alejada y se supone un medio de propagación homogéneo, las superficies de onda incidentes, es decir, las que llegan al objetivo, son planas (fig. 3). La función del objetivo, sea refractor o reflector, es la de devolver ondas emergentes esféricas concéntricas cuyo centro es el foco F.

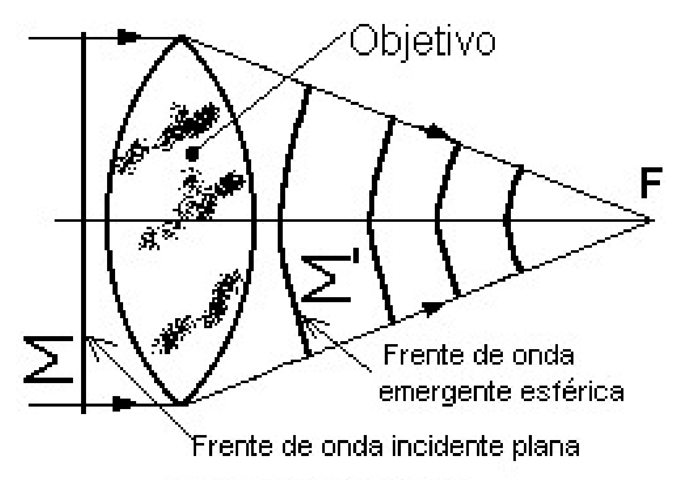


Fig. 3 Función del objetivo

Si la longitud de onda de la luz fuera infinitamente pequeña, esta definición sería equivalente a la de la óptica geométrica y el punto F sería un punto matemático en el que se concentraría toda la luz que hubiera alcanzado el objetivo, pero se sabe que no es así. Es posible apartarse lateralmente en una pequeña distancia FF’ antes de caer en la oscuridad; evidentemente el punto F no es verdaderamente un punto sino una mancha de diámetro 2FF’.

Si el objetivo está limitado por una abertura cuadrada, es fácil determinar la posición del punto F’ en el cual la oscuridad es total. (fig. 4).

Supongamos que el punto F’ se encuentre colocado en el plano focal a tal distancia de F que quede más próximo al borde superior P_3 de la onda emergente Σ que de su borde inferior P, siendo la diferencia exactamente de una longitud de onda; esto equivale a decir que si se traza, haciendo centro en F’, una superficie de onda ficticia tangente al borde superior de P_3 de la superficie de onda real Σ, se apartará de esta última, en la parte baja, exactamente en una longitud de onda: $PP_1 = \lambda$. Esta superficie de onda ficticia pone de manifiesto el interesante hecho siguiente: el trayecto P_2F’ contado a partir del centro de la onda es más largo en media longitud de onda que el trayecto P_3F’ que parte de su borde superior (proporcionalidad de los apartamientos). Pero en virtud de un célebre principio debido a Huygens, cada punto de nuestra onda Σ puede asimilarse a una fuente de luz. De esto resulta que nuestros rayos P_2F’ y P_3F’ que están en oposición en una media longitud de onda en el punto F’ se destruyen por interferencia y no pueden dar luz en ese punto.

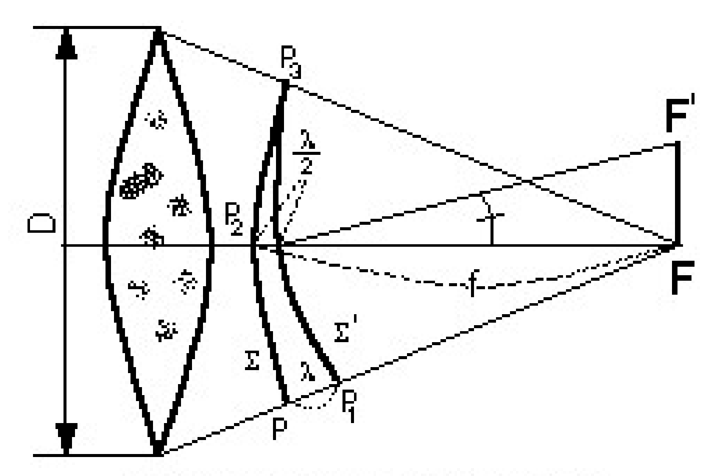


Fig. 4 Tamaño de la mancha de difracción

Pero esta propiedad es cierta para todos los puntos de la mitad superior de la onda (no olvidemos que su contorno es la mitad de un cuadrado) puesto que tienen un punto homólogo sobre la mitad inferior que corresponde a un trayecto más largo en λ/2, terminando la primera mitad en el punto P_2 finalizamos la segunda en P y concluimos en que no puede llegar ninguna luz al punto F' a partir de los puntos fuentes repartidos sobre Σ que interfieren completamente en este punto. La mancha de difracción termina pues en F'; es fácil de calcular su semilado FF'.

Se tiene sensiblemente (relaciones inexactas a la escala de la figura 4, muy distinta de la realidad):

$$\mathbf{FP_2F' = PP_3P_1 \text{ pero } FP_2F' = FF/f \text{ y } PP_3P_1 = \lambda/D}$$

Por consiguiente:

$$\mathbf{FF' = \lambda\, F / D}$$

En realidad, se utilizan objetivos de contorno circular y éstos no corresponden punto por punto en los trayectos ópticos que difieren en λ/2 y el cálculo del *radio* de la mancha de difracción, que evidentemente es circular esta vez, es mucho más difícil y nos contentaremos con enunciar aquí el resultado fundamental del cálculo realizado por primera vez por G. Airy: el radio *lineal* de la mancha de difracción dada por un objetivo de diámetro D y de longitud focal f es igual a:

$$\rho \textbf{ lineal} = \mathbf{1{,}22\, \lambda\, f/D}$$

Se sabe que la relación f/D caracteriza el inverso de la *abertura relativa* del objetivo; λ es la longitud de onda de los rayos luminosos; para los rayos más activos al ojo vale 0,56 μmi[1] y por lo tanto con un espejo común de telescopio abierto a f/D = 6, el radio de la mancha de difracción medida en el plano focal es:

$$\rho = \mathbf{1{,}22 \ X \ 0{,}56 \ X \ 6 = 4{,}1 \ \mu m}$$

Tal es el límite impuesto por la difracción. El óptico debe retocar el espejo hasta que todos los rayos emergentes converjan efectivamente en un pequeño círculo de ésta dimensión.

Todos los objetivos que tengan la misma abertura relativa dan idénticas manchas de difracción, pero su importancia angular disminuye cuando la longitud focal *f* y por consiguiente D, aumentan. El radio angular de la mancha de difracción interesa en primer lugar al astrónomo, puesto que fija el límite del detalle más pequeño que puede verse con cierta seguridad en el instrumento. Vale en radianes:

$$\rho_{ang} = \mathbf{1{,}22 \ \lambda/D}$$

Para la conversión en segundos de arco es necesario multiplicar por 206,265” lo cual da 14,1/D. Se ve que el diámetro depende sólo de la longitud de onda de la luz y el diámetro D del objetivo. El astrónomo se halla mucho más limitado que el micrógrafo en la selección de la longitud de onda de la luz empleada; está absolutamente obligado a aceptar la luz de las estrellas tal como puede llegarnos a través del filtro muy selector que es nuestra atmósfera; si desea ver más detalles tiene entonces que aumentar necesariamente el diámetro de su objetivo. Frecuentemente toda la vida de un aficionado transcurre en la conquista, paso a paso de esta potencia; veremos más adelante la necesidad de limitarse.

Si se considera la repartición de la energía luminosa en la mancha de difracción, se ve que en el centro la intensidad es muy grande, que disminuye rápidamente y se anula en el anillo negro de radio ρ que acabamos de calcular, pero que más allá, la interferencia no es total; aparecen anillos débilmente luminosos que se van desvaneciendo. Con una estrella muy brillante se ve justamente el primer anillo y un poco el segundo. Es importante familiarizarse con este falso disco rodeado de anillos que presentan las estrellas examinadas con un aumento muy fuerte y un objetivo perfecto. Se tiene un buen criterio para el enfoque exacto tratando de conseguir que el primer anillo negro resulte tan oscuro como sea posible; pero esto sólo puede lograrse, naturalmente, con un buen objetivo.

No es necesario ningún material costoso para observar esta apariencia teórica: coloquemos delante de una lámpara eléctrica con filamento visible una pantalla de cartón delgado perforada con un pequeño agujero practicado con una aguja o un alfiler común de 7/10 mm de diámetro. Colocando el ojo a 1 ó 2 metros de esta “estrella artificial” no se observan anillos ni el falso disco, puesto que el objetivo de nuestro ojo es muy grande para falsearnos la realidad en estas condiciones, pero coloquemos contra el ojo un pequeño diafragma obtenido esta

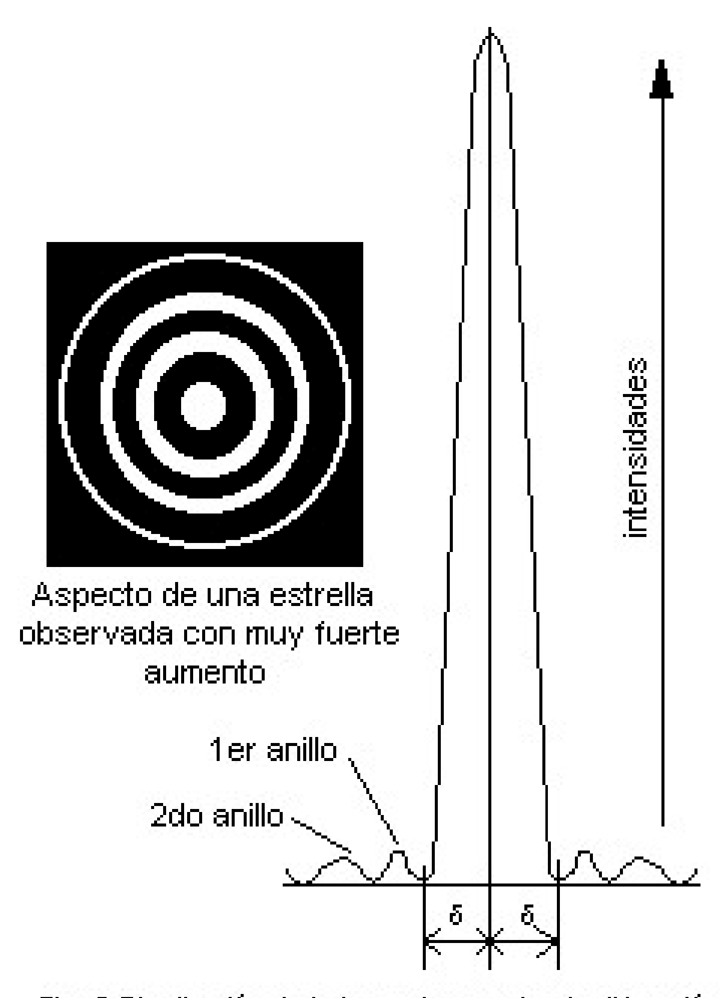


Fig. 5 Distribución de la luz en la mancha de difracción

vez no pasando sino la mitad de la longitud de la punta de nuestra aguja en una tarjeta de presentación; Si la porción del filamento de la lámpara está exactamente detrás del agujero-estrella, veremos esta vez admirablemente el aspecto teórico de la figura 5, y podemos verificar, introduciendo más o menos la aguja en la tarjeta de presentación, que el diámetro del falso disco disminuye puesto que nos acercamos a la realidad, cuando el diámetro del objetivo aumenta.

1.4 Regla de Lord Rayleigh

Es interesante establecer el tamaño del defecto material del objetivo que comienza a atenuar la perfección de la imagen de difracción. Lord Rayleigh encontró que si la onda defectuosa real dada por el objetivo no se aparta de la onda esférica en más de ¼ de longitud de onda de la luz, la imagen de difracción no sufre más que débiles alteraciones; el máximo central queda reducido al 80% de su valor y el primer mínimo no es totalmente nulo.

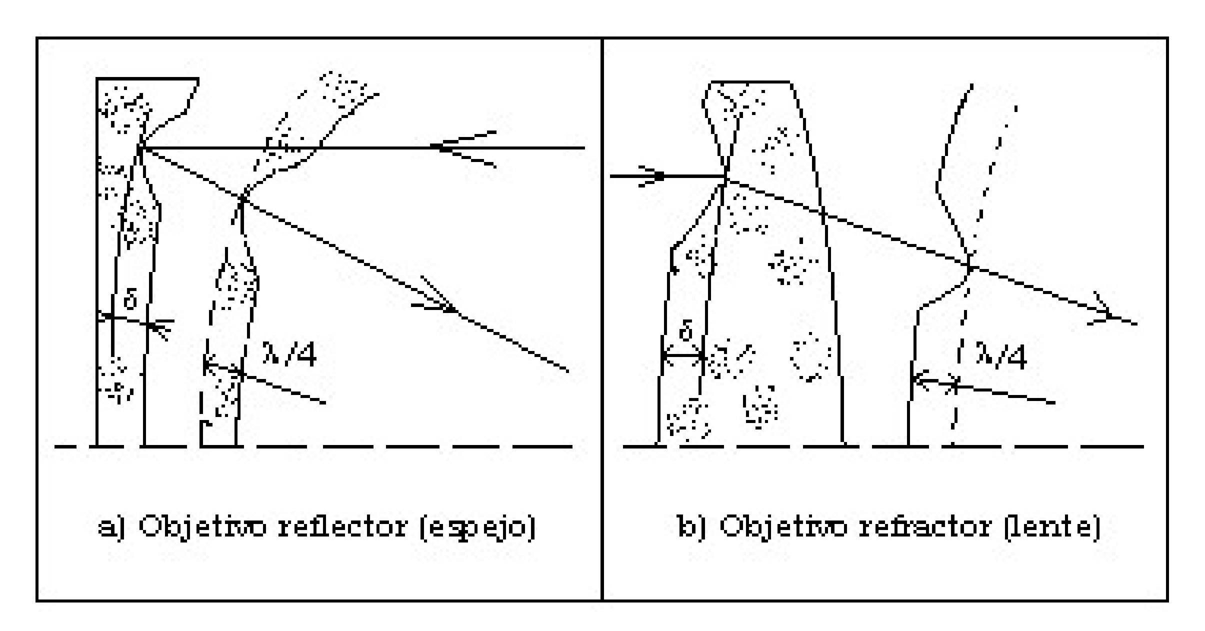


Fig. 6 Defectos tolerables con un objetivo reflector y refractor

Como se adopta esta tolerancia, es por lo general útil mostrar cual es la correspondiente sobre el vidrio: ¼ de longitud de onda de los rayos de luz más activos sobre el ojo = 0,56 μm/4 = 0,14 μm.

Si se trata de un espejo (fig. 6a) que representa un defecto cóncavo de profundidad δ, se ve que los rayos luminosos deben recorrer dos veces un camino suplementario; la onda emergente tendrá entonces un retardo total de 2δ y es necesario que sea $\delta \leq 0{,}14/2$ μm. El mayor defecto que podrá tolerarse será de 0,07 μm (70 millonésimas de milímetro, o 2,76 millonésimas de pulgada) en un espejo.

Por el contrario si se trata de un lente (fig. 6b) con el mismo defecto cóncavo, la luz debe atravesar un menor espesor de vidrio; de modo que se producirá un avance sobre la onda emergente que valdrá:

$$\varepsilon = \delta\ (\mathbf{n - 1})$$

Donde n es el índice de refracción, n-1 es aproximadamente 0,5 para el vidrio "crown" ordinario, si se desea que ε no exceda el cuarto de onda, se podrá tolerar sobre el vidrio un defecto de 0,28 μm que es cuatro veces más grande que en el caso de un espejo.

Estaríamos equivocados al creer que un objetivo que cumpla esta condición sería necesariamente perfecto. Para precisar mencionemos las restricciones siguientes que tendremos en cuenta en oportunidad del control final. :

A. Danjon [2] recordando que nuestro interés es el defecto real que se presenta efectivamente cuando se observa, afirma la necesidad de tener en cuenta las perturbaciones atmosféricas que se agregan a los defectos del objetivo, cuya suma excede con mucha frecuencia el límite tolerable, si el objetivo tiene ya defectos aproximados al cuarto de onda; semejante objetivo es mucho más sensible a la agitación atmosférica que un objetivo perfecto del mismo diámetro, lo cual carece de interés si no es la turbulencia lo que se estudia.

A. Couderii [3] mostró además que la forma y el número de los defectos tienen gran importancia; por ejemplo muchos defectos pequeños con pendientes abruptas pueden arrojar fuera del falso disco de la mancha de difracción, una buena parte de la energía luminosa y ofreció en el *Bulletin de la S. A. F.iii[4]* un ejemplo de una grave alteración de este tipoiv[5].

Por último, considerando la visibilidad de los objetos poco contrastados y no solamente el caso muy favorable de una estrella, Françonv[6] encontró que para los más débiles contrastes perceptibles (que se encuentran en la observación planetaria) un defecto sobre la onda igual a λ/16 ya comienza a ser perjudicial, lo cual hace que el más grande defecto tolerable sobre un espejo sea menor que 0,02 μm. Por otra parte, lo más difícil no es lograr el objetivo con esta precisión, sino el obtener efectivamente sobre el cielo una onda emergente de esta calidad. Todos los observadores de planetas conocen la pérdida de visibilidad de las regiones débiles cuando la imagen no es muy buena.

1.5 Descripción somera de los principales tipos de instrumentos astronómicos

Los telescopios refractores (lentes) tienen un tubo largo (fig. 7) provisto en un extremo de un objetivo acromático compuesto por lo general de dos lentes tallados en vidrios distintos, que deben responder a rigurosas condiciones de homogeneidad y de índice de refracción, y cuyas curvaturas de contacto coinciden. El otro extremo del tubo lleva un portaocular que permite el enfoque y el cambio de ocular.

El objetivo de un telescopio reflector (espejos) es un espejo cóncavo que se presenta en la forma de un disco de vidrio grueso que puede tener defectos internos, puesto que sólo sirve de soporte; la cara pulida cóncava cuya curvatura es apenas visible para un profano (aproximadamente 2 milímetros de profundidad para un espejo común de 20 cm de diámetro) se vuelve reflectora por un depósito de plata obtenido por reducción química o por un depósito de aluminio evaporado en el vacío (la capa es normalmente de 1/10 de μm o micra).

El espejo colocado en la parte baja del tubo daría una imagen inaccesible en un pequeño instrumento, puesto que el observador interceptaría con su cabeza la mayor parte de los rayos de luz; en el montaje de Newton (fig. 7) se proyecta el haz fuera del tubo en una posición cómoda para observar; en el montaje de Cassegrainvi[7] (fig. 7) el espejo principal (parabólico) tiene un hueco en el centro que permite el paso del cono de rayos luminosos prolongados por la interposición de un pequeño espejo convexo (hiperbólico) dentro del haz principal.

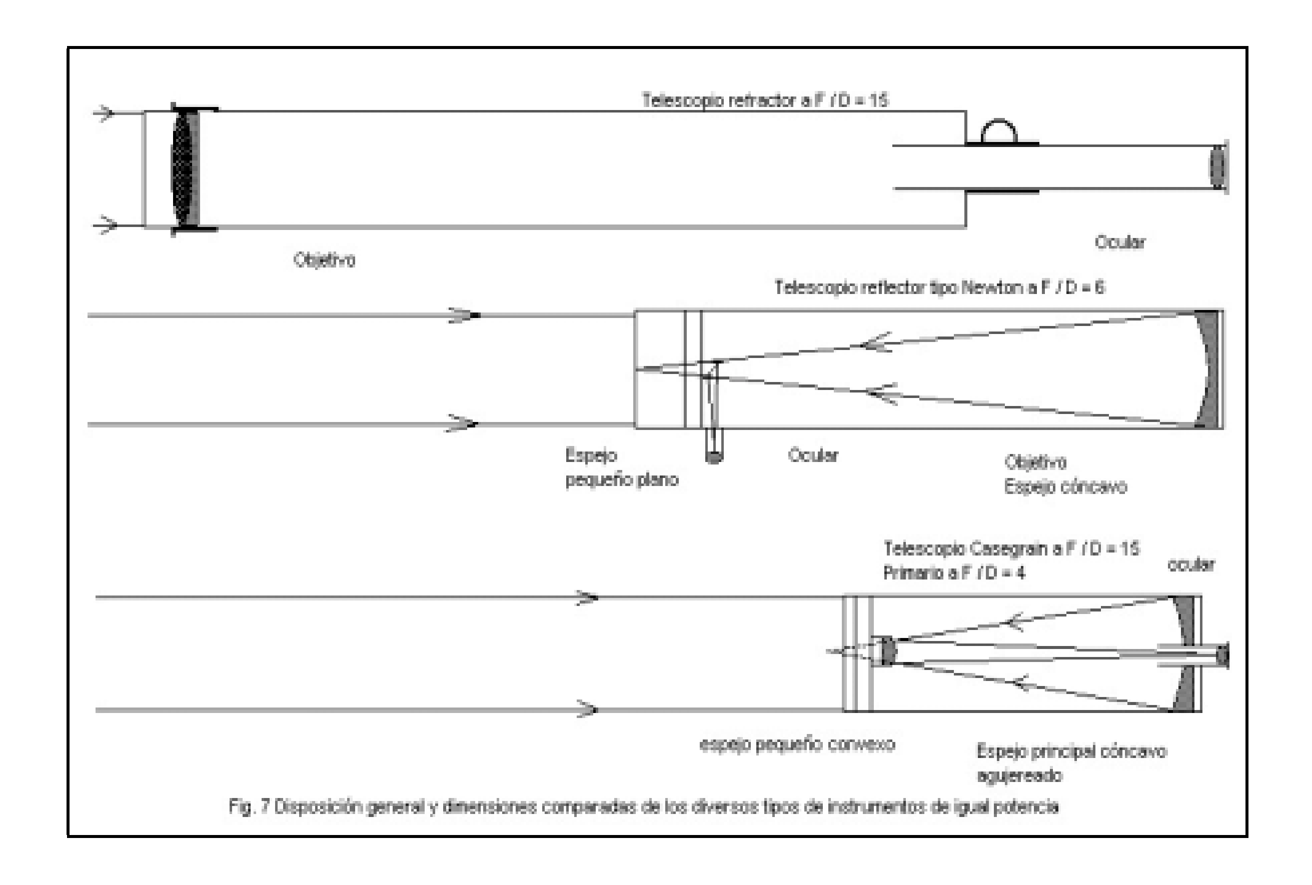


Fig. 7 Disposición general y dimensiones comparadas de los diversos tipos de instrumentos de igual potencia

No existe ningún instrumento universal verdaderamente bien adaptado para trabajos muy diferentes; hasta el simple aficionado que por curiosidad hace una observación no especializada de las curiosidades del cielo, tiene interés en resolver su elección del tipo, de las dimensiones, de la montura que debe adoptar teniendo en cuenta:

- El trabajo más especialmente considerado.
- El emplazamiento disponible.
- El presupuesto, las herramientas, la habilidad que se tenga.

1.6 Refractor o reflector

Esta cuestión ha sido debatida muchas veces; nos limitaremos aquí a indicaciones muy breves, pero tomando en consideración argumentos prácticos que pesan mucho en las realizaciones de los aficionados.

Hemos visto en el numeral 3 que la figura de difracción sólo dependía de la longitud de onda de la luz y del diámetro del objetivo; un objetivo refractor y un espejo del mismo diámetro son pues equivalentes en cuanto a la pequeñez de los detalles perceptibles. Como otro punto común al refractor y al reflector puede mencionarse que para diámetros corrientes de una veintena de centímetros y respecto de las radiaciones sensibles para el ojo, la cantidad de luz reflejada por una combinación de dos espejos bien plateados o aluminizados es casi la misma que la que atraviesa un objetivo de dos lentes.

Veamos ahora las diferencias que pueden decidir nuestra elección:

1.6.1 Telescopio refractor (lentes)

Generalmente preferidos en Francia.

Ventajas

- Imágenes calmas; ningún remolino de convección dentro del tubo, cerrado arriba por el objetivo.
- Estabilidad de la longitud focal (medidas micrométricas, fotografías).
- Deformaciones de los lentes (flexiones, dilataciones) menos perjudiciales a las imágenes que las de un espejo.
- Posibilidad de fácil corrección de la “coma”, lo que aumenta el campo utilizable en fotografía.
- Simplicidad de uso; los objetivos, poco alterables, no requieren casi ninguna conservación. Los instrumentos pequeños están casi siempre centrados definitivamente por el constructor, pero todo observador digno de este nombre debe saber hacer el centrado.

Inconvenientes

- Acromatismo imperfecto; especialmente en las radiaciones de cortas longitudes de onda (violeta) son extendidas, por un objeto visual muy lejos del foco de los rayos amarillos (fig. 8). El instrumento actúa como un filtro selector amarillo. Las mejores tentativas de corrección, difícilmente aplicables más allá de los 20 cm de abertura, comportan otros inconvenientes (curvaturas muy pronunciadas, agregado de un tercer lente).

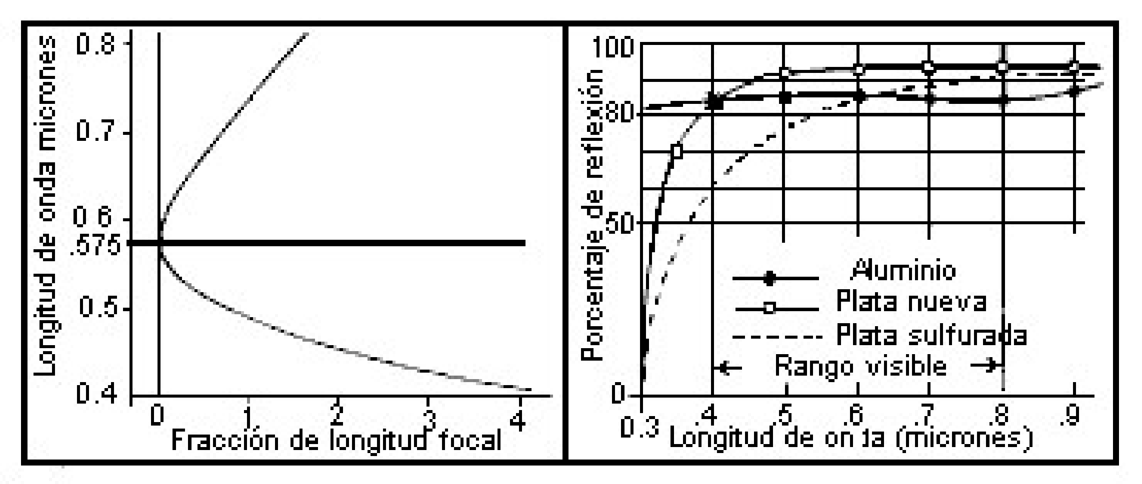


Fig 8. Aberración cromática longitudinal de un objetivo refractor
Fig 9. Poder reflector de espejos aluminizados o plateados

- Tamaño (fig. 7); para que el inconveniente precedente sea admisible es forzoso adoptar una longitud focal al rededor de quince veces la abertura del objetivo. A partir de los 20 cm de abertura (tubo de 3 metros de largo) esto se vuelve impracticable para el aficionado.

- Costosa realización: el objetivo se talla en vidrios de óptica de primera calidad que cuestan muy caro si exceden los 15 cm de diámetro; se necesitan ciertas herramientas y piezas de referencia de control para tallarlos, no obstante la precisión cuatro veces menor de las superficies. Es un capital demasiado elevado para ser arriesgado por un principiante.

- El precio total del instrumento es siempre mucho más elevado que el de un telescopio reflector (espejos) equivalente.

1.6.2 Telescopio reflector (espejos)

Más comunes entre los aficionados angloamericanos.

Ventajas

- Acromatismo perfecto; las capas de plata y aluminio tienen un poder reflector elevado y casi constante para toda la extensión del espectro visible (fig. 9).
- Tamaño reducido (fig. 7); el tubo es, por lo menos, dos veces más corto que el de un telescopio refractor (lentes) de la misma abertura, de lo cual resulta una mayor estabilidad de la montura, facilidad de instalación y de observación.
- Posibilidad de tallar uno mismo la pieza maestra más costosa; el espejo tiene muy poco costo; esto coloca al alcance del aficionado medio, diámetros de objetivos que le serían absolutamente inaccesibles de otra forma (hasta 50 cm de diámetro por lo menos).

Inconvenientes

- Obstrucción por el espejo secundario; la pérdida de luz generalmente no tiene importancia, pero la figura de difracción se altera ligeramente. Si el espejo pequeño tiene un diámetro igual a un cuarto del grande, el primer anillo de difracción tiene doblada la intensidad a expensas de la mancha central, cuya cúspide es reducida en un 15%vii[8]. Las tres o cuatro láminas delgadas que sostienen el espejo secundario provocan cuatro o seis finos penachos alrededor de las estrellas brillantes; es un inconveniente no despreciable especialmente en la observación planetaria, pero no debe ser exagerado; algunos prefieren los refractores que tienen un residuo de aberración esférica que refuerza mucho más el primer anillo. Por otra parte se lo puede reducir casi a nada adoptando una relación f/D = 8 ó 10 eligiendo un espejo plano (en el Newton) que cubra justamente el haz axial lo que no presenta inconveniente para la observación planetaria; de este modo puede reducirse la obstrucción a 1/8 aproximadamente, lo cual vuelve inútiles las soluciones escabrosas de los espejos empleados fuera del eje.
- Campo reducido; con las combinaciones clásicas la imágen sólo es perfecta sobre el eje; para la observación visual, el campo es siempre suficiente como para no constituir un inconveniente, pero hay que tomarlo en cuenta en fotografía.
- Oculares; con la relación f/D =6 para obtener fuertes aumentos es necesario emplear oculares de foco muy corto; por otra parte, la corrección de los oculares simples es insuficiente para un cono de rayos tan abiertos y para obtener buenos resultados es preciso adquirir costosos oculares ortoscópicos; estos dos inconvenientes son eliminados simultáneamente con la adopción de la combinación Cassegrain, desgraciadamente un poco más difícil de construir por un principiante.
- Agitación de las imágenes; el más grave por no decir el único defecto práctico. Los remolinos de convección dentro del tubo son muy difíciles de eliminar y es mucho más difícil observar la figura teórica de difracción sobre una estrella que con un telescopio refractor del mismo diámetro y la observación planetaria es igualmente

más trabajosa puesto que los momentos utilizables son menos frecuentes. No obstante, en un instrumento de 20 cm de abertura es bastante fácil lograr buenos resultados con la condición de no copiar los modelos clásicos de los constructores o las armazones de los telescopios gigantes.

- Deformaciones térmicas y mecánicas del espejo; plano focal levemente desplazado e introducción de aberración esférica. En un instrumento chico el efecto es insensible; para fijar ideas, digamos que en un cierto telescopio Cassegrain de 25,7 centímetros de abertura y 5,5 metros de longitud focal, el paso del tornillo micrométrico no ha variado en 1/100 de segundo de arco en un año (La variación diurna es todavía más débil).
- Replateado; en la ciudad es necesario replatear regularmente cada seis meses los espejos no protegidos (fig. 9). Actualmente el aluminizado elimina esta molestia, puesto que una buena capa, dura normalmente cinco años y conserva su elevado poder reflector durante ese tiempo.

1.7 Conclusión práctica: El telescopio estándar.

Para una revisión general de las curiosidades del cielo, frecuentemente uno se contenta con un pequeño instrumento de menos de 110 mm de abertura, que debe ocasionar el mínimo de preocupaciones a su poseedor; no cabe duda de que es preferible un telescopio reflector en estas condiciones. Advirtamos sin embargo, que un telescopio reflector de 150 milímetros, aun por la mitad de cualquier principiante, es indiscutiblemente superior al telescopio refractor de 110 milímetro de la industria y cuesta como mínimo treinta veces menos.

Es necesario un instrumento más potente para ver detalles interesantes sobre los planetas, seguir débiles estrellas variables, observar las estrellas dobles un poco cerradas, ver convenientemente las nebulosas, etcétera, pero 20 centímetros de abertura para un telescopio refractor es casi impracticable para un particular; aquel que mide estrellas dobles le dará, sin duda, otra vez la preferencia (a causa de la visión más fácil del falso disco y no debida a la variación de foco del espejo), pero todos los demás elegirán por fuerza un telescopio reflector, que es menos costoso y más fácil de instalar. La relativa facilidad que existe en tallar uno mismo un potente espejo de hasta 50 centímetros de diámetro constituye también un peligro; es necesario decir por adelantado que si es posible aprovechar cómodamente un espejo de 20 cm con una montura azimutal muy simple pesando en total menos de 20 Kg, un telescopio de 50 cm, en cambio, no puede, razonablemente, evitar una pesada montura ecuatorial y representa en conjunto cerca de una tonelada de mecánica.

La carrera por el diámetro no debe hacer olvidar las limitaciones relacionadas con el peso y dimensiones y, sobre todo, con la calidad de las imágenes que proporcionan las condiciones locales. Es necesario no olvidar jamás que en la ciudad, salvo excepción, es imposible utilizar convenientemente un instrumento de más de 150 milímetros de abertura a través de una ventana. Sobre un balcón común, un telescopio de 200 milímetros representa el máximo práctico; en un granero provisto de una gran abertura a bastidor rodante, un telescopio de 250 milímetros trabaja ya pocas veces a pleno rendimiento; para ir más lejos, es necesario una azotea protegida del calor por medio de esteras y que sea bastante firme o, mejor todavía, un amplio espacio bien despejado de toda construcción en medio de un prado cubierto de césped. Pero ahora aparece el problema del resguardo: una ligera cúpula de cinc no protege al instrumento del calor, y una construcción de doble pared resulta cara; una casilla con techo corredizo no produce remolinos del tipo causado por la abertura clásica, pero la protección contra el viento no es tan buena; no podemos tratar sino superficialmente todas las dificultades que esperan a aquel que quiere utilizar convenientemente un instrumento de más de 30 cm de abertura.

Tenemos ahora cuanto nos hace falta para elegir las características esenciales del instrumento estándar del aficionado:

- Este será un telescopio reflector que es más fácil de construir y estorba menos que uno refractor de diámetro igual.

- Será del tipo “Newton”, más fácil de realizar para un principiante que el modelo “Cassegrain”.

- Tendrá 20 centímetros de abertura, buen compromiso general entre la potencia y las dificultades de realización y uso.

- Su abertura relativa f/D = 8 ó 6, según se disponga de un adecuado emplazamiento.

- Su montura será azimutal y del modelo imaginado por A. Couder, puesto que es la más fácil de realizar correctamente con poco gasto para el aficionado.



Fig 10. El telescopio estándar

A partir de éste momento, las indicaciones que daremos se referirán casi especialmente a este modelo, pero todo lo concerniente al trabajo del vidrio es aplicable casi sin cambio a los espejos de 15 a 30 centímetros de diámetro.

[1]la notación mm es micro - metro que por acuerdo internacional reemplazó a la "micra".

[2] Del estudio interferencial de la titilación, del Institut d'Optique.

[3] Défauts des instruments réels (Defectos de los instrumentos reales), Cahiers de Physique.

[4] Societé Astronomique de France

[5] Sur la contruction cellulaire des mirroirs de télescopes (Sobre la construcción celular de los espejos para telescopios)

[6] Vision dans un instrument entaché d'aberration sphérique (visión de un instrumento con aberración esférica).

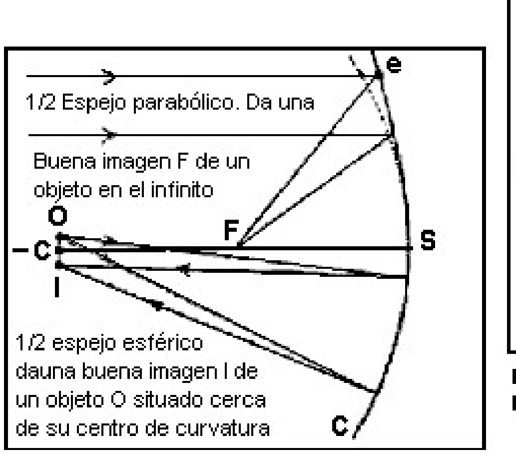
[7] Cassegrain no es "cacerola de granos" sino el apellido de su inventor.

[8] Para mayores detalles consultar el estudio de Louis Roy.

2. Realización del espejo principal

La forma del espejo principal en el telescopio de Newton

Las leyes elementales de la reflexión permiten prever fácilmente que un espejo esférico cóncavo dará una imagen perfecta de un objeto colocado cerca de su centro de curvatura; la observación de astros que pueden considerarse como infinitamente alejados exige por el contrario, que todos los rayos incidentes paralelos al eje (figura 11) sean reflejados por nuestro espejo de modo de reunirse en el mismo punto F. Esta condición unida a las leyes de reflexión permite prever por la geometría y sin ambigüedad, la forma de la meridiana del espejo que dará una imagen focal perfecta sobre el eje CS de un objeto al infinito; ésta es una parábola de eje CS y la superficie cóncava engendrada por esta curva girando sobre su eje es un paraboloide, pero por una incorrección del lenguaje corriente, se dice casi siempre un espejo parabólico.



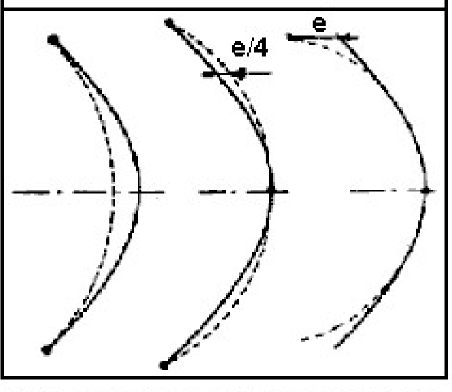


Fig 11. Necesidad de un espejo parabólico
Fig 12. Comparación de parábola con 3 esferas de radios decrecientes.

Tal definición no debe amedrentar a los no matemáticos ni hacerles creer que se trata de una forma difícil de obtener. Veremos un poco más adelante que la forma general que tiende a generarse automáticamente durante el pulido, si se trabaja convenientemente, es la forma esférica; para apreciar la dificultad del trabajo es entonces natural comparar el paraboloide con la esfera. Este cotejo puede hacerse de muchas maneras diferentes según el radio de la esfera elegida (figura 12). Si se considera la esfera tangente a la cúspide del espejo, como la parábola tiene una curvatura que disminuye ligeramente yendo hacia el borde (en el taller se dice que se “endereza”) se abre un poco más que ésta esfera y la separación máxima en el borde, de magnitud *e* mide:

$$e = \frac{h^4}{64f^3}$$

h es la altura de incidencia o radio del espejo en el punto considerado;

f es la longitud focal.

Con el espejo de nuestro telescopio estándar a f/D = 6 resulta:

h = 10 ***f = 120***

$$e = \frac{10^4}{64x120^3} = 0{,}9x10^{-4}\,cm$$

Solamente nueve décimos de micrón.

Pero existe una esfera de radio ligeramente diferente, tangente en el centro del paraboloide, que lo corta en el borde (figura 12) con relación a la cual la separación es cuatro veces menor; en el caso que nos interesa, ésta vale 0,22 micrones.

Tal diferencia es del orden de magnitud equivalente a la que el pulido cuidadoso introduce por lo general con respecto a la esfera para vidrios de éste diámetro; contrariamente a lo que se cree, es tan fácil engendrar de primera intención semejante parábola como una esfera, pero no sería lo mismo con un espejo más grande o más abierto. **Es necesario ser bastante ingenuo para escuchar a los ópticos de la industria comentar complacidos sobre las dificultades del parabolizado, cuando la superficie que ellos creen esférica posee ya defectos del orden de las deformaciones que nos preocupan** (una longitud de onda) pero que desgraciadamente están distribuidos al azar; nosotros queremos como mínimo una precisión diez veces mayor.

Si f/D es un número bastante grande, o dicho de otro modo, si la abertura relativa es suficientemente pequeña, se comprende que la parábola no se apartará mucho de la esfera, de manera que un espejo esférico satisfará la regla de Rayleigh y dará imágenes estelares prácticamente perfectas.

Tomamos de Lunetes et tèlescopes la fórmula que indica la longitud focal *f* que es necesario dar a un espejo esférico de diámetro D para que satisfaga ésta condición:

$$f^3 \geq 34{,}9 D^4$$

Damos ejemplos para espejos de aficionados:

D en cm	f min. cm	f / D
8	52	6,5
10	70	7,0
12	90	7,5
15	120	8,1
18	153	8,5
20	177	8,9
21	190	9,0
25	240	9,6
30	303	10,1

¡ Pero cuidado! es preciso que el espejo sea realmente esférico; sería perfectamente ridículo tallar el espejo de la última línea de esta tabla con 3 m de longitud focal, si no se tiene necesidad de tal relación de abertura, en la esperanza de obtener automáticamente una esfera utilizable. Por el contrario, un modesto principiante, deseoso de simplificar al máximo su empresa y evitarse controles, tendrá alguna posibilidad de lograrlo con un espejo de menos de 15 cm que responda a éstas características. Volveremos en detalle sobre este punto.

Generalidades sobre el trabajo del vidrio y teorías del pulido

Para un principiante es siempre motivo de sorpresa saber que las superficies más precisas que el hombre sabe realizar están hechas a mano, sin la ayuda de la más pequeña máquina y mediante procedimientos aparentemente infantiles. Somos víctimas de nuestro "buen sentido", lentamente formado por este siglo de la tecnología que nos lleva a admirar las bellas y complicadas máquinas, y nos es necesario un verdadero esfuerzo para tener una visión sensata de la cuestión. El trabajo de las superficies de alta precisión está dominado por dos hechos esenciales conocidos o inconscientemente aplicados desde la edad de piedra. El aprovechamiento de los procedimientos de ajuste por frotamiento y la ley de los grandes números.

Ajustar por frotamiento una superficie es frotarla contra otra de extensión comparable, que toma ahora el nombre de **herramienta**, con la interposición de un abrasivo, es decir de un polvo compuesto por pequeños granos cortantes más duros que el cuerpo a trabajar. La combinación del movimiento de translación y de la presión que se le ejerce a las piezas, presión repartida sobre las duras y agudas aristas de los granos de abrasivo (figura 13), provoca en una sustancia frágil como el vidrio una multitud de fracturas y de pequeños fragmentos, principalmente en las regiones sobresalientes, que tienden entonces a desaparecer.

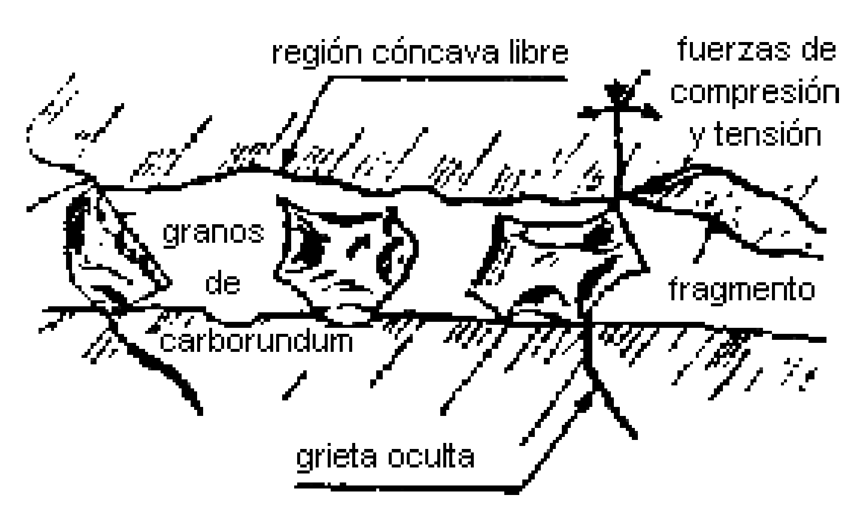


Fig 13. Mecanismo de la abrasión (J. Strong).

Si la ley del movimiento relativo de las piezas es tal, que un régimen de presiones iguales pueda existir en todas partes, se obtendrá automáticamente la nivelación de las superficies con una precisión mejor que el diámetro de los granos interpuestos. Si este movimiento está dirigido en todo sentido, las superficies tomarán necesariamente una forma esférica (o plana como caso particular) puesto que ésta es la única que permite el contacto con todas las posiciones. Los accidentes elementales, pequeños pozos y fracturas, son también comparables en dimensiones al tamaño de los granos interpuestos. Pero una pequeña desigualdad en la presión, por ejemplo repetida siempre sobre el mismo punto en la carrera, no dejaría de crear una notable deformación; para evitarla, es necesario volver improbable esta repetición exacta y aprovechar la ley de los promedios. Como el trabajo exige en total varias centenas de millares de carreras se concibe que si el movimiento está dado por la mano de una persona que sabe poco más o menos la amplitud que debe dar al movimiento se producirá a la larga una asombrosa compensación exacta de los errores individuales; puede decirse que cuantas más torpezas cometa el operador, tanto mejor resultará.

Cuando se talla un espejo de más de un metro, el manejo de la herramienta puede superar las fuerzas de un hombre o de varios; se está obligado a utilizar una máquina; la dificultad consiste entonces en saber romper de manera tan incoherente como sea posible la “personalidad” de esta máquina; siempre se termina, de todos modos, por un trabajo local con la mano.

La ejecución de la superficie óptica de un espejo comprende tres fases principales:

El desbastado

Partiendo de un tosco disco de vidrio cuyas caras son aproximadamente planas se excava una de ellas frotándola sobre una contraparte que es otro disco de vidrio del mismo diámetro, interponiendo un abrasivo muy duro y relativamente grueso (**carborundum** # 80 de 1/10 de mm de grosor) y haciendo carreras anormales que tienen por efecto localizar la presión casi únicamente en el centro del disco del espejo, que adquiere rápidamente la concavidad deseada.

El esmerilado y el alisado

Tienen el doble objeto de mejorar la forma general precedente y disminuir todo lo posible la importancia de los accidentes elementales de modo de posibilitar luego el siguiente paso. A la inversa del desbastado, se emplean ahora abrasivos de grosor decreciente, de los cuales los más finos están compuestos de granos de algunos micrones de diámetro y carreras normales tendientes a producir una acción uniforme sobre toda la superficie. Cuando los accidentes no tienen sino algunos micrones de profundidad llegan a ser difíciles de reducir de manera muy regular y simultánea por todas partes. Por lo tanto, la idea lógica de pasar insensiblemente del alisado al pulido es contradicha por la experiencia; existe una discontinuidad entre ambos; parece que la pequeñez de los accidentes que pueden desprenderse del vidrio está limitada; aquí falla nuestro buen sentido.

El pulido

Es en efecto una operación muy diferente. El rojo para pulir está compuesto por granos muy regulares de 0,5 micrones de diámetro, el cual produciría una especie de alisado si se continuara utilizando con la herramienta dura precedente. En su lugar, se recubre la herramienta de una sustancia como la brea, capaz de amoldarse a la larga a la forma exacta del vidrio a trabajar, pero que es rígida durante el corto tiempo que dura una carrera; dentro de esta sustancia es donde los granos de rojo van a alojarse para constituir la “torta”.

Pero es difícil tener una idea clara de lo que sucede durante el trabajo. Los más célebres talladores de espejos, Newton y Hershell, creían que el pulido no era sino una especie de frotamiento fino cuyos accidentes se volvían tan pequeños como para constituir una superficie unida al grado deseado. Elihu Thompson, continuando con esta idea, describe la acción de la torta de brea, guarnecida de partículas de rojo, como ajustándose automáticamente y a un nivel común en el curso del prensado y del trabajo y produciendo una red de rayas ultramicroscópicas; de un modo semejante J. Strong dice que las partículas de abrasivo tienen sus caras cristalinas orientadas idénticamente por el movimiento y paralelamente a la superficie; la torta se transforma en un “raspador complejo” cuyos elementos, automáticamente ajustados al mismo nivel, producen un desgaste muy alisado. B. Lyot, que consideró la cuestión del pulido con un rigor particular para sus lentes de coronógrafo, declara haber observado efectivamente, al proyectar la imagen de un arco eléctrico potente sobre una superficie, innumerables pequeñas rayas cruzadas en todo sentido no obstante estar pulida con un cuidado particular. Sin embargo, la explicación juzgada generalmente como la más satisfactoria es la de Lord Rayleigh, el cual advierte que, desde el comienzo del pulido, las cúspides de los accidentes son niveladas con un acabado perfecto; El ultramicroscopio nada muestra; los pequeños planos así formados aumentan en superficie hasta que alcanzan el fondo de las picaduras más profundas sin cambiar la calidad de las áreas ya pulidas. Los accidentes son de dimensiones moleculares, como los de la superficie libre de un fluido.

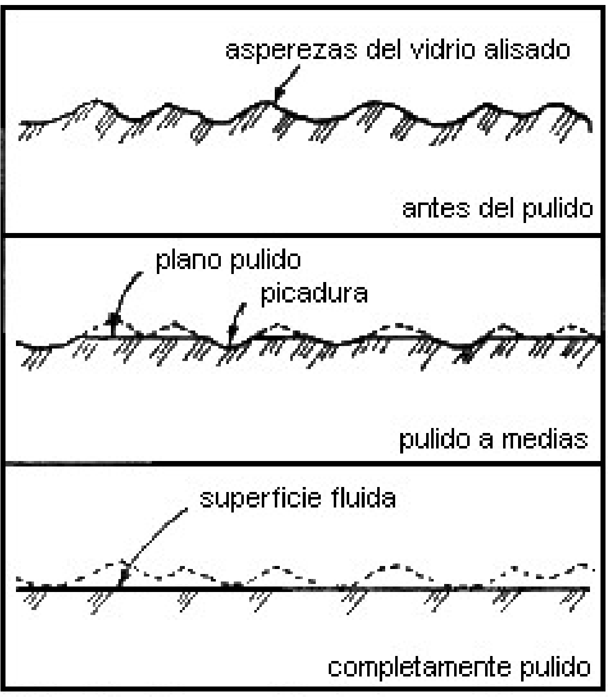


Fig 14. Ilustración de la teoría de Lord Raileigh.

El vidrio es pues arrancado en una escala molecular (se pesa la pieza antes y después), proceso totalmente a la acción del abrasivo sobre una herramienta dura, que arranca siempre trozos enormes con respecto a las moléculas.

Sin embargo, no hay seguridad de que el pulido consista solamente en sacar vidrio. Ingeniosas experiencias de Motz y Selby, tienden a mostrar que en el curso del pulido existe una capa de Beilby que es bien evidente en el pulido de los metales. Esta importante fuerza transformada en calor en el curso del trabajo bastaría, considerando la mala conductividad del vidrio y de la brea, para ablandar una capa de vidrio muy delgada que se extendería inmediatamente por untado como la mantequilla sobre el pan, según ciertos autores; esta sorprendente explicación haría comprender mejor la reaparición de picaduras en cierto modo tapadas, cuando se rehace con un método menos violento, el pulido de una superficie trabajada **brutalmente** por la industria. Sin discutir el valor de las ideas de Lord Rayleigh, puede muy bien admitirse una parte de corrimiento, aunque verdaderamente muy débil, en el trabajo de la óptica astronómica.

Es evidente que no obstante la simplicidad de los medios empleados, una explicación realmente satisfactoria de lo que sucede implica grandes dificultades.

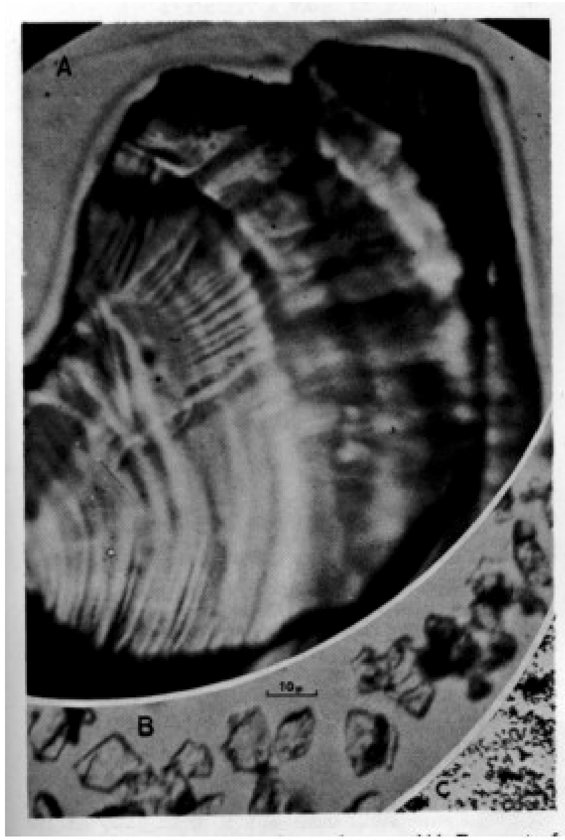


Fig 15. Microfotografía de un grano de carborundum120 esmeril M 303 y rojo para pulir.

El microscopio óptico muestra además fácilmente los granos de rojo cuyo grosor (0,5 μm) no parece casi modificado aún después de un pulido brutal, (ver la figura 15); pero es difícil decir cómo estos granos se fijan en la brea y nos parece imposible hablar de su forma de acción sin tener en cuenta las tensiones superficiales y las enormes atracciones moleculares que existen al nivel de la capa de vidrio recientemente puesta al descubierto, cuando el agua escasea al final de la “mojada” (se verá más adelante). Aunque la forma de acción permanece incomprensible, el resultado puede ser controlado de manera bastante exacta, y ello sin mencionar el microscopio electrónico que proporciona preciosas indicaciones sobre los accidentes elementales de las superficies pulidas; mencionemos el hermoso método, desarrollado por B. Lyot, que pone de manifiesto defectos de algunos milímetros cuadrados de superficie que corresponden en altura a desniveles del orden molecular (algunos Angstroms) presentados por vidrios muy bien pulidos. Pero es necesario volver a los defectos todavía más extendidos que afectan la forma general de la pieza óptica. Sabemos con qué precisión debe respetarse esta forma; los procedimiento que hemos descrito permiten obtener de buenas a primeras las superficies esféricas pequeñas; bastante precisas si no se ha introducido ninguna causa de error, pero sería imprudente contar sistemáticamente con aquello y de todos modos imposible con un vidrio poco deformado de una veintena de centímetros. Felizmente **León Foucault** nos ha dejado un maravilloso medio de control universalmente empleado que permite ver los defectos de esfericidad como si fueran accesibles a nuestros sentidos; en las mejores condiciones se

manifiestan, con medios muy sencillos, defectos diez veces más pequeños que los que puede comenzar a perjudicar las imágenes.

Una vez reconocido el defecto en tamaño y posición, el retoque se realiza alterando convenientemente la acción de la torta en el lugar deseado, pero es difícil ser un verdadero maestro en esta acción puesto que ella no es claramente inteligible para nuestros sentidos; es necesario entonces esforzarse para obtener de primera intención la forma deseada con la mejor aproximación posible para reducir al mínimo el trabajo de retoque, por otra parte, la habilidad del óptico se mide por su aptitud para realizar con los métodos generales, la superficie deseada con una buena aproximación antes que por borrar, sin dejar rastros, la última zona saliente.

Todo lo dicho en este párrafo no constituye más que una advertencia al lector contra su “buen sentido”; los razonamientos simplistas no dejarán de acudir a su espíritu cuando gire en torno de su espejo (condición muy favorable para el funcionamiento de las células grises). No tenemos la pretensión de explicar el *porqué* cuando nos basta el *cómo* para alcanzar el resultado; aquellos que se contenten con esta explicación, no tendrán ninguna dificultad para lograr su espejo; los demás, si no disponen de un tiempo limitado, harían mejor en terminarlo igualmente y *después* hacer teorías.

El elemento principal

Los discos en cuarzo fundido o simplemente en Pyrex se consiguen importados de otros países a través de la red de Internet. Se puede pensar en utilizar verdadero vidrio de óptica, por ejemplo un crown boro-silicato o vidrio Durán o mejor aún, “Zerodur” pero es un lujo inútil además de costoso, puesto que el vidrio del espejo constituye sólo un soporte que no es atravesado por los rayos útiles. El vidrio utilizado más corrientemente es el vidrio M de Saint Gobain, especialmente recocido (anealed) para hacer discos de espejos lo cual le da un tinte más verdoso que el vidrio común; estos vidrios presentan un dibujo de temple regular y son entregados con el espesor deseado cuando tienen pequeños diámetros, con las caras esmeriladas planas por la piedra arenisca y los bordes sumariamente redondeados al diámetro solicitado.

Los discos destinados a “ojos de buey” de los barcos están recortados del vidrio pulido de Saint Gobain, cuyo espesor puede alcanzar 37 mm; este tipo de fabricación que no está complementado con un recocido especial explica el dibujo de temple más o menos complicado y excéntrico que presentan en la luz polarizada; esto no resulta un inconveniente importante para el tallado preciso de la superficie óptica; además el dorso del espejo puede quedar pulido, lo cual constituye una ventaja. Por último, los proveedores de baldosas de vidrio translúcidas suministran discos de caras planas más o menos rugosas que son perfectamente utilizables para hacer herramientas económicas y aún espejos, puesto que tratándose de un vidrio algo grueso el recocido no puede jamás ser descuidado por el fabricante sin correr el riesgo de quebrarse por sí mismas al enfriarse. Ya sabemos que son necesarios dos discos del mismo diámetro para tallar un espejo; el que se destinará a espejo debe ser elegido con algún cuidado, pero no importa la clase de vidrio que constituya la herramienta.

Al solicitar el diámetro es necesario aumentar en 1 cm la abertura nominal deseada pues hay que tener en cuenta el indispensable bisel y los defectos ópticos del borde extremo, que no siempre es posible evitar por completo. El espesor del espejo no debe elegirse al azar; el montaje correcto de pequeños espejos se hace en la forma más simple apoyándolo sobre tres puntos sobresalientes de la base del tubo del telescopio, dispuestos en los vértices de un triángulo equilátero exactamente inscrito en el contorno del vidrio; la relación de A. Couder permite calcular entonces el espesor mínimo de un disco para que no represente flexiones de carácter óptico perjudicial en estas condiciones cuando el instrumento se encuentre vertical.

$$e \geq \frac{R^4}{10^{\frac{3}{2}}}$$

R = radio del espejo en cm. e = espesor del espejo en cm.

D cm	e mm	Peso gr.
11,2	10	
10	8	
16	25	1250
18	27	1700
20	33	2600
22	40	3800
24	48	5430
30	71	
50	197	
80	504	
100	790	

En la tabla tenemos algunos ejemplos con espesores ligeramente aumentados teniendo en cuenta las pérdidas durante el desbastado. El peso del telescopio crece muy rápido en relación al peso del espejo; un espesor inútilmente grande es pues mucho más oneroso de lo que podría pensarse a priori y presenta además, serios inconvenientes para el equilibrio térmico. Excediendo los 25 cm de diámetro es preferible complicar la celda antes que continuar respetando la relación, que conduciría rápidamente a espesores prohibitivos.

El espesor del disco herramienta puede ser menor; de ahí la posibilidad de pulir con la herramienta arriba y presiones menores, lo que resulta ventajoso para la calidad de la forma. Se tomarán entonces baldosas de vidrio de aproximadamente 25 mm de espesor para las herramientas de hasta 20 cm de diámetro, y de 30 mm para aquellas que no excedan de 30 cm.

Abrasivos

El *carborundum* (carburo de silicio, SiC), obtenido industrialmente en el horno eléctrico es un polvo de color azul negro o verdoso, según la calidad, que se encuentra en el comercio. Los granos son clasificados por medio de tamices cuyo número de huecos por pulgada cuadrada define comercialmente el número. La gran dureza de este abrasivo permite ganar un tiempo apreciable en el desbastado; el grano 80 (separado con el tamiz de 80 huecos en una pulgada cuadrada) es a menudo empleado por los aficionados, pero si el espejo no pasa de 20 cm de diámetro y su flecha de 1,5 mm, es preferible atenerse al grano No. 120 que deja pozos más fáciles de borrar. (Daremos las cantidades más adelante.) Algunos fabricantes tienen series muy amplias que se extienden hasta el No. 3200 y pueden servir para esmerilar y alisar completamente los espejos, sobretodo aquellos en vidrios duros como el Pyrex. En Chile se consigue el carborundum hasta el número 400; para continuar el trabajo, nos contentaremos con desbastar y esmerilar con carborundum terminando el alisado con abrasivos menos duros:

El *corindón* industrial (corindite en algunos proveedores) está numerado por el mismo sistema que el carborundum pero es preciso notar que a igualdad de número produce pozos más pequeños y desgasta menos que el carborundum a causa de su menor dureza. El *esmeril* es el abrasivo que da los mejores resultados en el alisado. Se trata de la alúmina natural Al_2O_3 y se lo encuentra en forma de rocas (isla de Naxos) mezclado con diversas impurezas (óxido de hierro) que le confieren un tinte marrón o rojizo: después de la trituración se obtiene un polvo que por lo común es todavía clasificado por el viejo procedimiento clásico de la levigación y sobre el cual es necesario decir algunas palabras puesto que nos puede resultar útil.

Los granos de esmeril caen dentro del agua tanto más rápidamente cuanto más grandes son; si se revuelve bien cierta cantidad de polvo en un recipiente lleno de agua y bastante alto, se concibe que al cabo de poco tiempo (contado en minutos y de allí el nombre de minutaje debido a la operación) no permanecerán en suspensión sino los granos demasiado finos para poder decantar durante este tiempo; sacando el agua por medio de un sifón y dejando depositar el esmeril que contiene, se recogerá entonces el “esmeril de tantos minutos”. El decantado teórico se refiere a una caída dentro de un metro de agua;

prácticamente los esmeriles del mismo número vendido por diferentes proveedores son tan poco comparables entre sí como la rapidez de las emulsiones fotográficas dadas por diferentes fabricantes. Desgraciadamente éste no es su defecto más grave. Sin hablar del peligro de mezcla con los polvos más gruesos para los esmeriles vendidos al detal en bolsitas de papel y de las cuales nunca se desconfía lo bastante, es necesario llamar la atención sobre una operación importante que los proveedores no ópticos no realizan con sus esmeriles decantados: se trata del "lavado". Cuando se recogen los esmeriles más finos utilizados en al práctica, es decir aquellos de 40 y 60 minutos, se obtienen no sólo los granos que no atraviesan un metro de agua en 40 ó 60 minutos, sino también todos aquellos que son aún más pequeños y comprenden una especie de harina que constituyen un barro muy perjudicial en un correcto trabajo de abrasión. Es como si se quisiera emplear el esmeril usado que está mezclado con residuos de vidrio; para sacar partido de tales esmeriles es conveniente lavarlos muchas veces empleando un balde de una decena de litros, para máximo un Kg de esmeril; se comienza por revolver bien durante varios minutos para separar completamente el barro de los granos útiles y se lo deja reposar el tiempo suficiente para que se deposite el esmeril útil; el barro que sobrenada y el polvo que permanece en suspensión deben ser desechados con el agua del balde. Se renueva el agua y se comienza, hasta que el esmeril se deposite francamente en una masa marrón oscura o negruzca dejando un agua de decantación clara. Con los actuales esmeriles ordinarios del comercio podemos considerados afortunados si recuperamos el 50% del peso inicial como esmeril utilizable.

Los mercados americanos e ingleses tienen excelentes esmeriles blancos vendidos en cajas metálicas y que ofrecen todas las garantías: se encuentran los esmeriles de la British American Optical Co. En cajas de 5 libras de 457 gramos. El BM 302 ½ y para terminar el BM 303 ó 303 ½ bastan para obtener un excelente alisado con el máximo de seguridad.

Productos para pulir. Brea para tortas

Esta es una especie de resina segregada por los abetos del norte de Europa; funde a los 60º pero a la temperatura ambiente se amolda muy bien a la forma del objeto si se le presiona largamente sobre él. Esta viscosidad de la brea quizá sea su cualidad más preciada; debe evitarse dañarla por la adición de cera o de otros ingredientes. Las breas más famosas en óptica provienen de Suecia, Arcángel y Noruega, y se consiguen en toneles; la que se compra en panes por lo general fue calentada sin precauciones por el minorista y ha perdido algunas de sus cualidades; puede juzgarse sobre su calidad manteniendo un pequeño fragmento en la boca durante algunos minutos; si se la puede masticar y estirar como chicle, es muy buena; si se rompe entre los dientes se la puede mejorar adicionándole esencia de trementina, pero ésta no reemplazará a todos los solventes naturales que un torpe calentamiento le haya hecho perder. Como no es siempre fácil obtener la verdadera brea, mencionamos como productos de reemplazo aprovechables, la resina suavizada por el aceite de lino y la brea mineral convenientemente elegida, depurada y filtrada; en general, para evitar accidentes con estas tortas, conviene recubrirlas con una delgada capa de cera de abejas. Más adelante volveremos en detalle.

Rojo para pulir

El óxido de titanio (blanco) y especialmente el óxido de cerio (rosado), empleados generalmente en la industria, no son recomendables para las grandes superficies de precisión; a pesar de manchar, debe preferirse el rojo para pulir (conocido como “rojo mineral” y utilizado en construcción) obtenido por la calcinación en contacto con el aire, del oxalato ferroso (y no del sulfato ferroso que da los rojos industriales, colcótar, etcétera). Muchos de los abastecedores de abrasivos antedichos venden rojos para la óptica o el pulido de espejos, pero la calidad de estos productos no es siempre suficiente y por lo general es útil mejorarlos haciéndolos hervir en agua y espumando la crema de apariencia grasa que debe desecharse. El buen rojo, como el buen esmeril, cae francamente en el agua dejando clara el agua de decantación. La British American Optical Co. fabrica un excelente rojo designado por el No. BM 309 y puede obtenérselo, como los citados esmeriles blancos en los mismos comercios.

El mejor medio para obtener un buen rojo es, calcinar uno mismo el oxalato ferroso. Se trata de un polvo amarillo que se encuentra en algunos almacenes de productos químicos (por lo menos en Bogotá ni lo conocen); se extiende una capa de 2 a 3 cm de espesor en una adecuada chapa de hierro que se coloca sobre un fuego vivo (basta un mechero de gas abierto totalmente). Conviene ventilar abundantemente el local, pues existe un notable desprendimiento de óxido de carbono. Al cabo de un cuarto de hora el polvo se tuesta parcialmente al contacto con la chapa; se comienza en forma muy suave para evitar las proyecciones, a mezclarlo con una larga espátula metálica; continuando el calentamiento, toda la masa bien removida se vuelve de color pardo, luego se abrasa como la yesca. Hay que proseguir la operación hasta que el fuego cese por sí mismo, lo que indica que la calcinación está terminada. se deja enfriar y se lava el rojo en un gran recipiente de limpieza verificada; también se lo puede pasar a través de varios dobleces de medias de

nylon o mejor por el más fino tamiz para harina que se pueda encontrar. El rojo se conserva en estado húmedo como los esmeriles, en pequeños frascos de vidrio de tapa hermética.

Resumen práctico y cantidades necesarias

Para facilitar a los principiantes la compra de los productos necesarios damos más abajo un cuadro de los principales abrasivos y productos para pulir, con su designación comercial. Hemos aumentado considerablemente las cantidades necesarias para tomar en cuenta las torpezas inevitables al comienzo y también por el hecho de que los proveedores no gustan vender pequeñas cantidades, especialmente en provincias, de artículos de poco valor comercial como el rojo.

Operación	Cantidades	Carborundum	Esmeril
Desbastado	**1 Kg.**	**80**	
Esmerilado	**500 g**	**120**	
	500 g	**180**	
	500 g	**280**	
	250 g	**400**	
	125 g	**600**	
Alisado	**125 g**		**BM 302 ½**
	125 g		**BM 303 ½**
Pulido	**1 Kg**	**Brea para óptica**	
	250 g	**Rojo mineral**	
	ó 500 g	**Oxalato ferroso**	

Los números indicados no tienen nada de absoluto, son aproximados para producir buenos resultados; además, si se suprime uno de los intermedios se debe prolongar suficientemente el trabajo con el anterior y el posterior de la tabla.

Material útil para tallar el espejo

Es extremadamente reducido y en su mayor parte puede estar constituido por herramientas domésticas. Mencionamos especialmente:

El banco

El trabajo a mano de los espejos es llamado "de banco fijo". Éste puede ser realizado muy simplemente en el ángulo de un banco o de una fuerte mesa de cocina (figura 16A) en la que tres topes atornillados sobre la mesa impiden el arrastre del disco inferior, pero le permiten girar fácilmente o invertir los discos. La figura 16B muestra un perfeccionamiento de este montaje, compuesto de un plato giratorio que permite permanecer sentado frente al trabajo (como alguien en silla de ruedas); sin embargo, estas disposiciones no superan a las verdaderas mesas completamente aisladas que permiten circular fácilmente a su alrededor. Muchos ópticos famosos o clásicos (Draper, Metcalf, Ellison, etc.) trabajaron sobre un tonel puesto verticalmente (figura 16C) suficientemente lastrado para que no se le pueda sacudir durante el trabajo. La figura 16D presenta un modelo de mesa regularmente adoptado por los aficionados norteamericanos. Los dos últimos modelos (figuras 16E y 16F) son empleados en el taller de la *Commission des Instruments*. El primero, construido por Luc Ott con tres postes de madera unidos por planchas, tiene una tapa que alcanza exactamente para un espejo de 20 cm, lo que permitió reducir al mínimo su tamaño. Construimos el segundo en el taller de la *Commission* inspirándonos en las patas de instrumentos bien concebidos; se notará la considerable separación de los listones de cada una de las patas, permitiendo hacerlo trabajar casi exclusivamente por tracción o por compresión. Sea cual fuere la dirección del esfuerzo, se obtiene de este modo una rigidez muy grande con secciones mínimas de madera. Cualquiera que sea el modelo adoptado para la mesa, debe cumplir con los siguientes puntos:

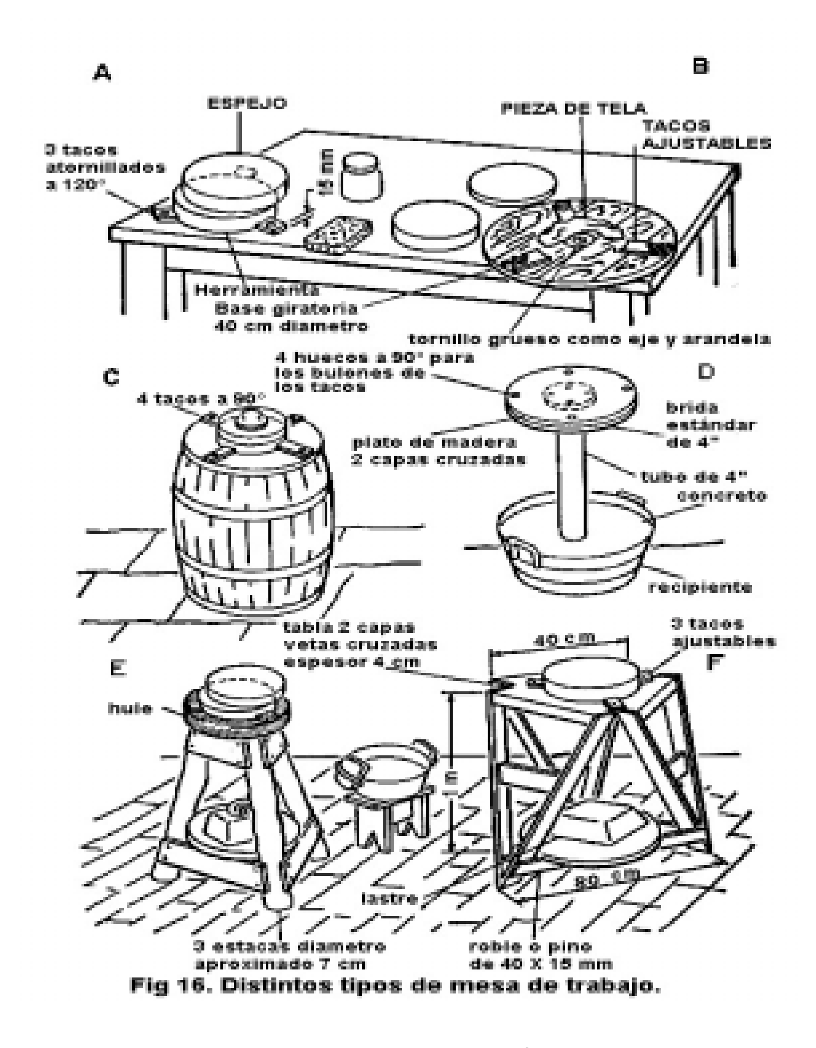


Fig 16. Distintos tipos de mesa de trabajo.

Rigidez general y estabilidad: Es necesario prever esfuerzos importantes durante el pulido y un lastre suficiente.

Altura de la mesa: según la talla del operador, podrá ser de 90 cm a un metro; algunos prefieren alturas de 1,2 m y aún de 1,5 m, pero para trabajar sin fatiga la altura máxima es la que media entre el suelo y el codo.

Planicidad del plato sobre el cual apoyará el vidrio; a pesar de la interposición de redondeles de cordobán o de franelas es necesario allanar bien esta cara del apoyo; por último es indispensable poder trabajar independientemente en la posición **espejo arriba o abajo**; es necesario prever por lo menos un taco ajustable para las pequeñas diferencias de diámetro inevitables y a causa de las irregularidades del contorno.

El material menor comprenderá: uno o dos recipientes un poco más grandes en diámetro que el espejo; cuatro o 5 esponjas no muy grandes (las esponjas vegetales de trama fina sirven perfectamente y son económicas); pequeños recipientes de vidrio con tapa para los abrasivos y el rojo, provistos de una indispensable etiqueta indicando el grosor y eventualmente el origen y la calidad; es útil disponer de un calentador de gas o eléctrico provisto de una chapa de hierro un poco más grande que el espejo y que tenga como

mínimo 3 mm de espesor; si fuera posible, un pico de bunsen con llama luminosa, o en su defecto, una vela; por último, cierta cantidad de trapo blancos, la cuchilla de un cepillo de carpintero bien afilado, un cincel, un pequeño pincel para el rojo, etc.

Para el control del desbastado, resultará útil una regla de mecánico o un buen calibrador; podrá utilizarse un esferómetro pero no es absolutamente indispensable. Tendremos ocasión de describir en detalle el aparato de control por el método de **Foucault**, que será fácil construir personalmente.

Operaciones anexas

El vidriero nos entrega los discos con un recortado sumario con el cual casi siempre nos conformamos. Ciertamente un espejo bien montado debe apoyar a lo sumo sobre 2 ó 3 puntos a 120º sobre su contorno y por lo tanto no es necesario que sea perfectamente redondo y centrado como el lente de un objetivo. Pero indudablemente es preferible un borde bien circular y esmerilado fino; no solamente por una razón estética, sino que se debe pensar en la facilidad de la limpieza en el momento del aluminizado; un borde rugoso retiene toda clase de impurezas (rojo de pulir etc.), muy difícil de eliminar completamente. No escribiremos la operación de recorte propiamente dicha puesto que sistemáticamente deseamos evitar la suposición de que el lector posea una máquina costosa (torno, taladro de pie), pero recomendaremos regularizar las asperezas de los discos en bruto.

Si se tiene un pequeño torno, puede ser improvisado con un cojinete horizontal, se puede pegar el espejo con brea sobre el plato superior centrándolo aproximadamente (ver figura 16). Al mismo tiempo se pega cerca del borde una empuñadura que sirve de manivela (figura 17A). Merced al movimiento de rotación, hecho posible de este modo, es fácil regularizar rápidamente las salientes y las asperezas por medio de una simple banda de zinc de 0,5 mm de espesor, un poco más ancha que el espesor del espejo, que sirve de soporte para el abrasivo interpuesto. Este sistema da fácilmente bordes regulares, pero evidentemente no puede corregir errores muy notables como sería una débil ovalización; mas esto carece de importancia.

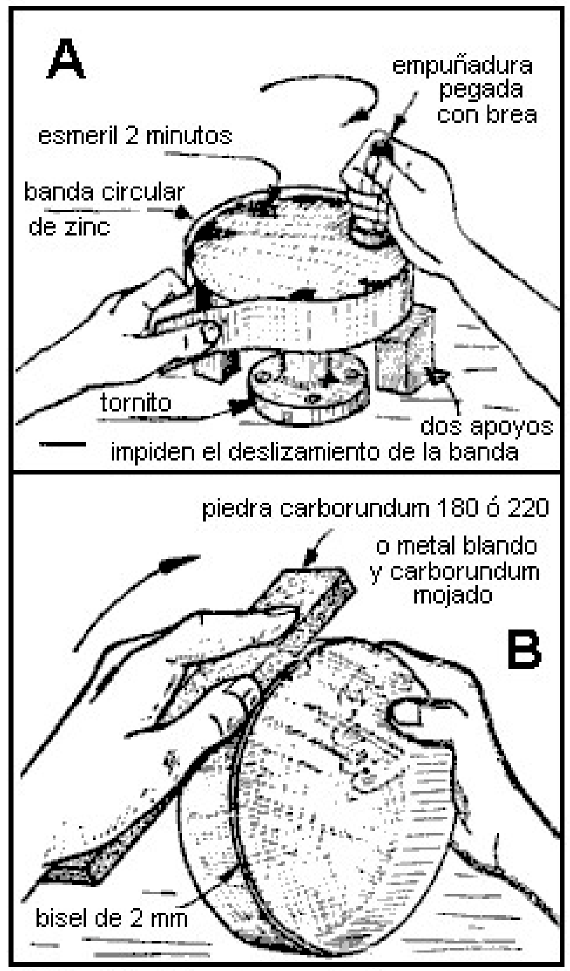


Fig 17. Nivelado rápido de las asperezas del borde

Si se renuncia al uso de la banda, es exactamente lo mismo igualar las asperezas y reducir el grano del contorno por medio de una piedra plana de carborundum (# 220 por ejemplo) y a falta de ésta, con un trozo de hierro plano o de latón que se frotará con el abrasivo interpuesto (figura 17B).

Mientras usamos la piedra de carborundum, igualemos también los biseles de ambas caras o aumentemos su tamaño; un bisel de 2 mm a 45º o un borde redondeado con este radio puede convenir para un espejo de cerca de 20 cm de diámetro; durante el trabajo de frotamiento tiende a desaparecer y es absolutamente necesario evitarlo; si alguna de las caras tiene un borde cortante, se producirán serias escamas al menor choque contra un cuerpo duro; el bisel que más se gasta es el de la herramienta y es conveniente darle desde el principio 3 ó 4 mm de ancho y aún así quizá sea necesario rehacerlo antes de finalizar el desbastado.

Por último, verifiquemos que las caras del disco espejo sean sensiblemente paralelas; un error prismático de 0,1 ó 0,2 mm no tendría gran importancia y por otra parte sería fácil corregirlo; si llega a 1 mm es menester corregir el disco por la fábrica para

evitarnos un aumento inútil del trabajo de desbastado. La cuestión del paralelismo no se presenta evidentemente, con los discos para ojos de buey recortados del vidrio de Saint Gobain, cuyas caras generalmente son paralelas con aproximación de una decena de micrones.

Desbastado del espejo

Ante todo, es necesario escoger la cara del disco espejo que se ha de excavar. Si el vidrio presenta en una de sus caras rugosidades superficiales (como las de las baldosas de vidrio) que no tengan más de 1 a 1,5 mm de profundidad, es ésta la cara que debe elegirse, pero naturalmente se tomará la otra si existen fracturas profundas que amenacen no desaparecer totalmente durante el desbastado, o burbujas capaces de formar "puntos hundidos" sobre la superficie óptica. Cuando el disco tiene ambas caras esmeriladas, es más fácil señalar los defectos internos por transparencia, mojándolo o mejor aceitándolo por ambos lados.

Pegando una manija en el reverso se facilita el manejo de los pequeños espejos delgados, pero esto no tiene absolutamente nada de indispensable y hasta es perjudicial durante el pulido. Recordemos a aquellos que peguen una manija, que la brea adhiere mal sobre un cuerpo frío, sobre todo si éste es buen conductor; es necesario calentar el espejo antes del pegado; un método rápido y sin riesgos consiste en sumergirlo durante unos minutos en agua tibia (35º a 40ºC; la mano experimenta una sensación de calor no dolorosa); al sacarlo del agua, cuidarlo de los enfriamientos bruscos (corrientes de aire) y secarlo cuidadosamente antes de volcar en el centro un poco de brea fundida; colocar la manija y centrarla con referencia al contorno antes del enfriamiento.

La brea fría es frágil y cede ante el menor choque brusco; para despegar la manija si el vidrio está frío basta golpearla secamente con un pequeño mazo de mango algo flexible.

Comienzo

La herramienta está convenientemente colocada sobre la mesa (se puede dejar 1 mm de juego para poder girarla o levantarla sin dificultad). Extendamos sobre su superficie 1 ó 2 cm^3 de carborundum 80 ó 120 extraídos del recipiente donde se lo mantiene en estado húmedo, arrojemos con los dedos algunas gotas de agua suplementarias, pongamos el espejo encima y frotemos. Para obtener buen rendimiento y el rápido vaciado de la concavidad se atenderán las siguientes normas:

1. **Sacar el espejo todo lo posible**; el centro del espejo puede llegar sin riesgos hasta 1 ó 2 cm del borde de la herramienta y las carreras rectilíneas dirigidas siguiendo cuerdas (figura 18A) podrán tener una decena de cm en vidrios de 20 cm; una pequeña experiencia indicará el límite no peligroso para el balanceo del espejo al borde de la herramienta. Se pueden hacer de 5 a 10 carreras rectilíneas sobre el mismo lugar; luego se gira el espejo entre las manos una fracción de vuelta y se reanuda el trabajo en otra fracción de vuelta en sentido contrario a la la del espejo desplazándose alrededor de la mesa. Si ésta permite la rotación

completa del operador, la herramienta puede permanecer inmóvil; en caso contrario se la hará girar en conjunto con el espejo en la misma dirección del giro de éste. Ejemplo : si giró el espejo 10º, debe girar el conjunto 10º. El espejo habrá girado 20º y la herramienta 10º. La idea es utilizar de manera regular toda la periferia. Puede verse en la figura 18A, la figura descrita por el centro del espejo en el transcurso de este trabajo.

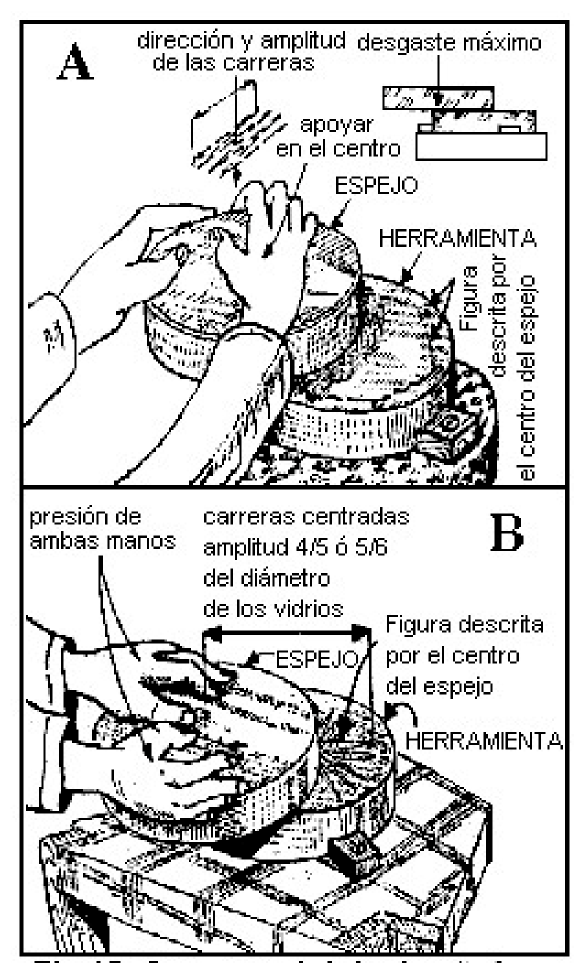


Fig 18. Carreras del desbastado

Es completamente inútil girar con rapidez en torno de la mesa, sobre todo en el desbastado; todo el trabajo se realiza por el movimiento de vaivén. A título informativo digamos que pueden hacerse de 60 a 80 dobles (ida y venida) carreras cada una o dos vueltas alrededor de la mesa y durante este tiempo, por ejemplo, se habrá hecho girar el espejo tres o cuatro vueltas. Es inútil decir que resulta pueril empeñarse en respetar exactamente estos valores.

Cuando los discos tienen caras muy rugosas hay que gastar también un poco el borde del espejo. En este caso es ventajoso emplear carreras centradas (figura 18B) de amplitud muy grande: 5/6 del diámetro del espejo, equivalente a 16 cm con uno de 20cm y aún más.

2. **Ejercer gran presión sobre el vidrio.** El carborundum 80 no rinde toda su eficacia sino cuando se le aplica una presión suficiente; no hay que temer apoyarse con todo el peso sobre el centro del vidrio (figura 18A). Si el espejo es delgado y muy liviano puede ser ventajoso adherirle, a modo de manija y para el desbastado únicamente, un peso de varios kilos.

3. **Mojar correctamente el abrasivo.** Si hay exceso de agua el carborundum es proyectado hacia los bordes antes de haber podido rendir toda su eficacia; si está muy seco se reparte mal, no se elimina el polvo de vidrio producido por la abrasión y forma una mezcla que paraliza el movimiento a costa de la eficacia. Se advierte que la proporción es correcta por el intenso ruido de la abrasión con el carborundum del desbastado. A pesar de su gran dureza, el carborundum no resiste largo tiempo tal trabajo; al cabo de pocos minutos (dos a cuatro minutos, según la cantidad inicial de abrasivo y de la energía gastada) se debilita el ruido de la abrasión y el polvo de vidrio fija el agua. Podría prolongarse un poco más el trabajo agregando la cantidad necesaria de agua para limpiar el carborundum sin perder los granos útiles, pero es ventajoso para el rendimiento interrumpir el trabajo, enjuagar completamente ambos discos, secarlos brevemente y recomenzar con nuevo carborundum. Se acaba de hacer lo que en términos de taller se llama “una secada” o “una mojada”.

El desbastado de un espejo de 20 cm a f/D = 6 requiere aproximadamente 3 horas de trabajo en estas condiciones, pero un principiante no deberá asombrarse si necesita un tiempo doble. Ver fig. 18c

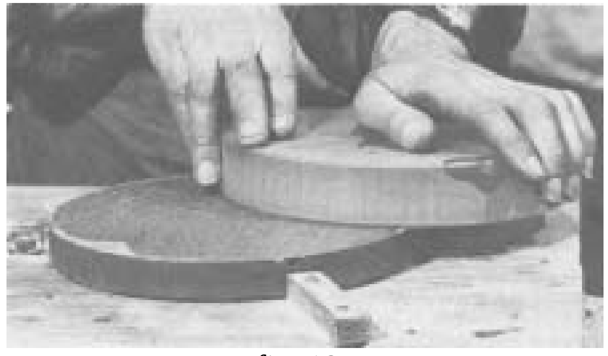


fig. 18c

Control del radio de curvatura

Elegido el diámetro útil y la relación f/D, queda fijada la longitud focal del espejo y en consecuencia su radio de curvatura, que vale el doble de esa longitud focal. Por ejemplo, el espejo estándar de 20 cm de f/D = 6 tiene una longitud focal de 20 X 6 = 120 cm y un radio de curvatura de 240 cm. Poco importa respetar exactamente el valor elegido, puesto que no construiremos el tubo del instrumento sino cuando poseamos la parte óptica; además el radio de curvatura puede ser vigilado durante el desbastado por métodos bastante rudimentarios, con aproximación de algunas centésimas.

Lo más cómodo es cortar una plantilla que puede trazarse con un compás de vara sobre una lámina de metal, fácil de cortar exactamente con la tijera (el zinc es muy conveniente), o mejor recortarlo directamente con la punta de un compás de vara tallado en bisel (figura 19A). La apreciación de la luz entre la plantilla y el vidrio es un medio sensible si la iluminación es intensa, pero hay que presentar la plantilla en diferentes posiciones para poner de manifiesto sus propios defectos.

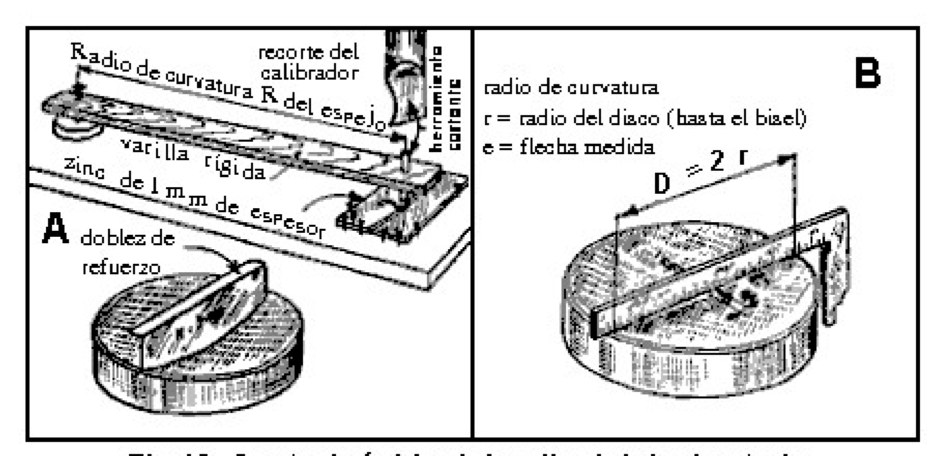


Fig 19. Control rápido del radio del desbastado

Si se posee una buena regla de mecánico (puede ser la de un buen calibre) se puede asimismo medir la flecha de curvatura, es decir, el hueco que tiene el vidrio en el centro. El radio de curvatura R se obtiene por la siguiente fórmula:

$$R = \frac{r^2 + e^2}{2e}$$

en la cual: **r** es el radio útil del espejo, es decir, el semidiámetro sobre el cual reposa la regla.

e es la flecha de curvatura, que se mide pasando por el centro calzas de espesor conocido (figura 19B).

Cuando la calza es muy gruesa, la regla se balancea; cuando es muy delgada, pasa libremente sin tocar la regla. Como ejemplo supongamos que nuestro espejo mide hasta el bisel 197 mm (r = 98,5) y que hemos encontrado una flecha e de 1,9 mm. El radio de curvatura mide entonces: 2554 mm. Si queremos un radio de 2400 hay que continuar excavando para obtener aproximadamente 2 mm de flecha, pero no tratemos de "terminarlo"; las superficies obtenidas en el desbastado requieren ser mejoradas en forma y finura y no tendremos ninguna dificultad en obtener un radio más exacto en el curso del trabajo.

Fin del desbastado

Sobre la figura 20, donde las curvaturas están muy exageradas para la claridad del dibujo, se ve que en la posición muy excéntrica del disco espejo, adoptada durante el desbastado, el desgaste de ambos discos no ha sido regular: en el borde del espejo queda una zona circular plana y en el centro de la herramienta una pequeña “mosca”. La diferencia con la esfera puede exceder 0,1 mm en un espejo de 20 cm y deberá terminarse el desbastado por un método menos rápido pero que corregirá este defecto. Esto es difícil y basta continuar el trabajo con carreras aproximadamente centradas como indica la figura 18B pero con una amplitud total del movimiento que no exceda ahora la mitad del diámetro de los discos.



Fig 20. Deformación de los vidrios desbastados

Durante este trabajo la zona circular y la “mosca” desaparecen; puede ocurrir también que se exceda la flecha de curvatura y en este caso basta continuar el trabajo con el espejo abajo y comunicar a la herramienta exactamente los mismos movimientos que se dieron anteriormente al espejo. Para este desbastado final y con el objeto de limitar la profundidad de las fracturas del carborundum, siempre trabajosas de eliminar, es natural que suspendamos la aplicación de grandes presiones; es suficiente el peso del espejo o el de la herramienta adicionada al correspondiente a las manos del operador apoyadas en forma natural. La plantilla siguiendo un diámetro, mostrará fácilmente si el vidrio tiene aproximadamente el radio de curvatura y la forma deseada; las operaciones de esmerilado y alisado que seguirán, mejorarán rápida y automáticamente de esta forma, de modo que resultarán innecesarios los medios mecánicos de control.

Esmerilado y alisado

Ante todo hay que limpiar cuidadosamente y con abundante agua todos los objetos que han sido tocados por el carborundum: espejo, herramienta, mesa, soporte, etc. Cuidaremos especialmente los intersticios capaces de haber retenido el abrasivo grueso; los tacos laterales de la mesa serán desmontados, cepillados dentro del agua o, mejor aún, cambiados; La manija eventual puede ser quitada entretanto y lavado el dorso del espejo. Si la mesa no tiene hule, antes de colocar nuevamente los tacos se la recubrirá con un papel blanco, que será renovado a cada cambio de abrasivo y la misma precaución es conveniente para la mesa de trabajo, que recibirá los accesorios indispensables. Si no se puede disponer más que de un recipiente para el agua, hay que enjuagarlo varias veces y asegurarse que ni por dentro ni por fuera muestre pequeños y brillantes puntos de carborundum. El recipiente y la esponja del carborundum serán puestos fuera del taller.

Estas precauciones nada tienen de pueriles; un solo grano de carborundum en el final del alisado puede arruinar el fruto de un día de trabajo y los negligentes pronto adquirirán prudencia.

Se prosigue el trabajo con el carborundum 120 cuyos granos dejan fracturas menos profundas debido a su menor tamaño. Desde ahora y de manera general adoptaremos para el resto del trabajo carreras normales, sobre las cuales hay que llamar especialmente la atención: consisten en un movimiento de vaivén casi centrado (figura 21) cuya amplitud total es aproximadamente de 1/3 del diámetro de los discos (en consecuencia deben sobresalir 1/6 hacia cada lado, o sea 3 a 4 cm con un espejo de 20 cm) con un desplazamiento lateral constantemente variable pero limitado a cada lado a 1/8 como máximo. La forma de las carreras puede también parecerse a una V o a una W o a un rizo más complicado tal como ∞ por ejemplo. Cada 5 ó 6 carreras se gira un poco el disco superior entre las manos mientras que gira uno mismo como durante el desbastado. Lo que es esencial en todo esto es solamente respetar más o menos por término medio la amplitud de 1/3 y variar las carreras lo más posible de modo de no trabajar siempre sistemáticamente de la misma manera; la ley de los promedios hará el resto y, si no se llega a cometer una torpeza excepcional y sistemática (presión anormal de las manos siempre en el mismo punto de la carrera), las superficies no se apartarán en promedio de la esfera sino en una magnitud muy inferior al diámetro de los granos del abrasivo interpuesto.

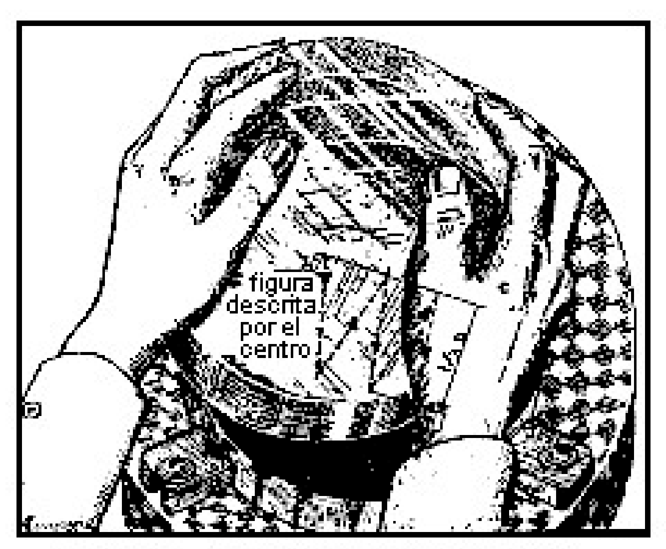


Fig 21. Carreras normales

Para el correcto empleo del abrasivo se tendrán en cuenta las indicaciones hechas anteriormente, pero en cuanto al peso, solo intervendrá el del disco superior más el de las manos del operador normalmente apoyadas, que no tienen otro objeto que dirigir el movimiento de vaivén. El alisado se hará de modo uniforme y sin cambio apreciable de la curvatura si se hace alternativamente una mojada con el espejo arriba y otra con el espejo abajo. Únicamente al comienzo es cuando la plantilla puede indicarnos realizar varias mojadas continuas en la misma posición para respetar mejor la curvatura. Con el espejo arriba se aumenta la concavidad y se la disminuye si es la herramienta la que está encima.

Después de 2 ó 3 mojadas con carborundum 120, un examen rápido por reflexión podrá hacer creer que las fracturas causadas por el carborundum 80 fueron eliminadas, pero si examinamos el vidrio por transparencia frente a una fuerte lámpara, veremos pequeños puntos brillantes esparcidos sobre el fondo uniforme trabajado por el C-120; también hay escamas no desprendidas, invisibles por el momento, pero que saltarán al continuar el trabajo dejando nuevos pocitos. Es pues necesario continuar el trabajo con el C-120 hasta que estemos seguros de haber eliminado todos estos accidentes, lo que nos exigirá 15, 20 o más mojadas. De todas maneras, el C-120 aún deja fracturas desiguales; se suspenderá el trabajo cuando se compruebe que los accidentes anormales localizados en la mojada precedente por un círculo de lápiz hecho en el dorso del espejo no se hallan más en el mismo sitio.

Número de mojadas para eliminar el grano precedente	Abrasivo
15 a 20	C-120
10	C-180
10	C-280
10	C-400
6	C-600
6	M-302
4	M-303 1/2

El trabajo de esmerilado se prosigue del mismo modo con los (carborundum) C-180, C-280, C-400 y C-600, sin olvidar el lavado del material a cada cambio de número. Para los que tengan dificultad en apreciar en qué momento se puede cambiar de abrasivo, indicamos el número de mojadas (cada una de 5 a 10 minutos de trabajo efectivo) normalmente suficientes para un espejo de 20 cm con el abrasivo adecuado y bien empleado.

En caso de duda, es preferible prolongar un poco el trabajo antes de pasar prematuramente de un abrasivo a otro. Con el carborundum 180 se ajustará lo mejor posible el radio de curvatura del espejo al del calibrador y también se podrá alisar el dorso del espejo si tenemos un disco desbastado con arena. Para ello nos serviremos del revés de la herramienta trabajando con carreras normales de 1/3 con el espejo arriba para obtener un revés más bien ligeramente cóncavo que convexo.

Puede utilizarse la misma esponja para los carborundum 120 y 180, pero es necesaria otra para los C-280 y C-400, y otra para el C-600. Una última completamente nueva, para los esmeriles M-302 y M-303 ½. Si se trata de una esponja natural, antes de mojarla hay que golpearla mucho con un mazo para eliminar los sedimentos calcáreos o silíceos que encierra.

El alisado

El alisado propiamente dicho comienza con el M-302; su calidad depende mucho de la del esmeril, y todavía más de la manera de utilizarlo. Para reducir al mínimo los riesgos de rayado y asegurarse una total eficacia en el trabajo, se pondrá especial cuidado en emplear la cantidad justa de esmeril y la conveniente de agua en cada mojada.

Intentemos dar una idea concreta, que no puede reemplazar a la experiencia directa, sobre la manera de operar: Se comienza siempre con los discos lavados y secados; nos aseguraremos que nada quede sobre la superficie pasándole la palma de la mano.

Utilizando los dedos se extiende luego el esmeril húmedo de modo de cubrir total y uniformemente uno de los discos; la cantidad suficiente para uno de 20 cm es aproximadamente, el volumen de un guisante grande. Tiene mucha importancia la cantidad inicial de agua; hay que proyectar con los dedos mojados suficiente cantidad de agua para obtener una brillante película de esmeril, pero sin que puedan recogerse gotas excedentes si se inclina el vidrio. Con precaución se apoya el segundo disco y se hacen algunas carreras para repartir el esmeril, aligerando el vidrio de una parte importante de su peso; se debe sentir y oír morder el esmeril sobre toda la superficie. Ver la fig. 21b



Si hay mucha agua, el esmeril desde el comienzo del trabajo se corre al borde; si es escasa, se forma prematuramente una papilla seca de esmeril usado y vidrio que paraliza el movimiento. En ambos casos el espesor de la película de esmeril no es uniforme; hay contacto de un vidrio con el otro y es posible una ralladura. A la temperatura de 20º C una mojada de esmeril fino debe durar 8 ó 10 minutos sin renovación de agua, pero esta duración no se aconseja a los principiantes. No hay que olvidar en cada mojada, invertir la posición de los discos. Durante la posición espejo abajo hay que cuidar el apoyar el vidrio sobre una mesa bien plana con la interposición de un disco de franela o muletón; los tacos laterales permitirán un pequeño juego al disco. Estas precauciones son necesarias si se quiere evitar que tensiones mecánicas perturbadoras, deformen el vidrio en una medida superior a los apartamientos de la esfera que un alisado bien conducido permite obtener automáticamente.

Cualidades de un buen alisado

Especialmente se pondrá cuidado en obtener un grano homogéneo; hay que lograr la desaparición de accidentes anormales. El examen por transparencia con una buena lupa (10X) no debe mostrar más que un fondo de fracturas muy pequeñas y uniformes, sin pequeños defectos diseminados, brillantes o negros. El tamaño de las fracturas elementales es de relativa importancia a partir del M-303 ½ aproximadamente; desde este momento no se logra sino multiplicar los riesgos de rayaduras sin real beneficio para el pulido (cuando se trata de grandes superficies trabajadas vidrio sobre vidrio). Aun con esmeriles de finura y homogeneidad excepcionales como el BM-305 (granos de 2 a 5 μm) subsisten accidentes muy dispersos; tratar de eliminarlos completamente llevará tanto tiempo como el pulido completo de toda una superficie obtenida con el M-303 ½ (granos de 10 μm). En este último caso, los pozos estarán simplemente distribuidos en forma más homogénea.

Es necesario también para obtener la mayor homogeneidad posible con un esmeril dado, cumplir con largueza la cantidad de mojadas; en caso de duda las cantidades precedentes deberán ser aumentadas. La última mojada de M-303 ½ exige especial cuidado y será realizada en la posición espejo abajo. Un práctico experimentado logra refinar el esmeril por un trabajo prolongado con la misma carga durante 12 ó 15 minutos. En este caso es indispensable la renovación del agua en el curso del trabajo, lo que resulta bastante delicado y no hay que esperar que la mojada esté muy avanzada para hacerlo. Las gotas de agua salpicadas con los dedos son a menudo muy grandes; debe intentarse depositar muy poca agua de manera uniforme y sin separar los discos que estarán en posición excéntrica, utilizando un pequeño atomizador o pasando el dedo sobre los pelos de un pequeño cepillo duro y mojado. Se termina el trabajo con el esmeril lo más seco posible pero sin presión anormal de las manos, con cuidado de que ambos discos no se peguen cuando la película de esmeril es muy delgada, y atendiendo a que el movimiento no se vuelva muy duro, por el riesgo de deformar las superficies.

Será mejor que el principiante no trate de refinar el esmeril; se contentará con prolongar la última mojada con el espejo abajo, sin tratar de renovar el agua.

Lord Rayleigh hizo notar que con una superficie alisada se puede obtener una imagen reflejada bajo un ángulo tanto más cercano a la normal cuanto más fina es la estructura de la superficie. Un espejo bien alisado debe mostrar una pálida imagen roja de un filamento de bombillo sobre un fondo negro, bajo un ángulo de 30 a 45º con el plano de la superficie (figura 22). Este ensayo no es concluyente; la superficie puede volverse reflectora aún para la incidencia normal, por una especie de pulido superficial realizado con un esmeril muy fino completamente pulverizado o por un trabajo de esmeril sobre brea (prepulido); esto no quiere decir que no subsistan entre las superficies suficientemente niveladas como dar la imagen reflejada, accidentes profundos que no podrán ser pulidos. No debe confundirse superficie brillante con superficie pulida.

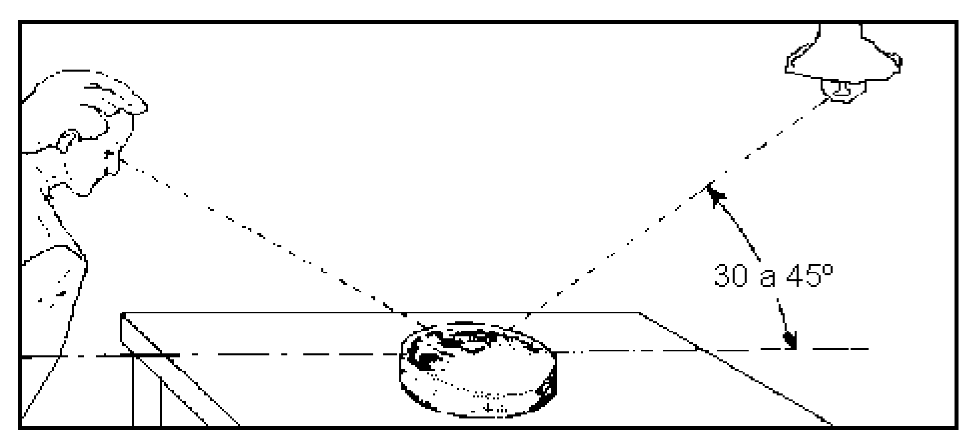


Fig 22. Poder reflector de una superficie alisada

Fracaso en el alisado

Rayado. Para eliminar una ralladura, aunque sea débil es necesario generalmente reanudar el trabajo con el carborundum 400 o quizá con el C-280 o aún el C-180 para los casos extremos, causados por un grano de abrasivo grueso o por una grave torpeza. Desgraciadamente no siempre es posible mejorar el esmeril comercial por levigación y lavados repetidos; si el fracaso persiste lo mejor será cambiar de proveedor o adherirse a un grupo local de talladores de espejos que puedan ser mejor abastecidos.

Pegado de los discos. Este accidente, muy raro con esmeril, al punto de que nosotros jamás lo tuvimos en la Comission, puede sobrevenir bruscamente si se trata de refinar al extremo un esmeril fino. La separación de los discos puede ofrecer dificultades, pero los métodos violentos deben evidentemente descartarse. R. W. Porter ha citado el empleo de una prensa de madera para actuar sobre los discos, que generalmente quedan en posición excéntrica. Si bien los pareceres están divididos, se estima que la introducción de kerosene por los bordes puede facilitar las cosas.

Forma incorrecta de las superficies. Éste es el más grave de los fracasos; una hipérbola en el alisado, por ejemplo, no tiene remedio. El lector que aplique las carreras normales indicadas precedentemente, con el espejo arriba y abajo, seguramente no engendrará un defecto de esta clase. Si al comienzo del pulido se observa que solamente se aclara el centro o el borde del espejo no hay que insistir y debe reanudarse el alisado a partir del M-302 cuidando que la amplitud de las carreras no exceda en mucho 1/3 del diámetro.

Generalidades sobre las tortas

Los pulidores de paño, muy empleados por los fabricantes de gafas y para la óptica ordinaria, no sirven para los trabajos de precisión a causa de la “carne de gallina” que producen. Los antiguos ópticos, especialmente **Foucault**, los hermanos Henry, algunos aficionados como Vincart y ciertos fabricantes de largavistas obtuvieron buenas superficies ópticas con tortas de papel; esta técnica ha caído no obstante en desuso tanto por la dificultad de obtener por este medio superficies completamente pulidas cuanto por la gran experiencia profesional necesaria para lograr un buen resultado. El aficionado A. W. Everest ideó una herramienta, utilizada generalmente por los aficionados, que merece cierta atención: se la realiza con facilidad empleando una hoja de cera estampada de las preparadas para marcos de colmenas (Honey Comb Foundation, de aquí la designación abreviada H. C. F.) que se pega a la herramienta utilizada para alisar y se moldea sobre yeso contra el espejo. Los delgados tabiques de los alvéolos de cera hundidos por el pasaje de una lámina delgada para facilitar la repartición de la papilla de rojo y aumentar la adherencia, pulen rápidamente y con el mínimo de riesgos de rayado. Desgraciadamente, presenta un gran inconveniente: esta herramienta produce ondulaciones muy graves que dependen de la dimensión de las células; los errores elementales de forma son también muy importantes y capaces de difundir una cantidad notable de luz, aun cuando el pulido físico sea muy completo. Tendremos ocasión más adelante de dar un ejemplo, a propósito de los métodos de control. Además la forma general conseguida corre el riesgo de resultar catastrófica en manos inexpertas, puesto que no se produce automáticamente un ajuste de la forma con un cuerpo rígido como la cera, que se gasta pero no se prensa. No obstante la relativa facilidad de eliminar defectos notables con adecuadas bandas de cera, no osamos recomendar su empleo ni aun a los debutantes, poco exigentes en cuanto a la calidad de su espejo.

Desde hace una cincuentena de años, profesionales y aficionados utilizan casi exclusivamente tortas de brea. En la industria, para la óptica de mediana precisión, trabajada a máquina, se emplean tortas llenas, constituidas por una mezcla de brea y cera negra u otros ingredientes menos deformables que la brea. Por el contrario, las grandes superficies de precisión, son pulidas con herramientas capaces de adaptarse con más exactitud, constituidas por panes de brea pura. Muchos aficionados se contentan con cavar canales ortogonales (perpendiculares) en una herramienta llena; pero es preferible preparar primero cuadrados de brea que serán pegados individualmente sobre la herramienta según una técnica ya utilizada por Alvan Clark, Common, Ritchey y que es mucho más apta para producir una torta perfecta, factor importante para el buen éxito. Únicamente nos ocuparemos aquí de este tipo de herramienta.

Fabricación de la torta con cuadrados de brea individuales

1. ***Fusión de la brea.*** (Los números se refieren a los de la figura 23). La brea se parte en pedazos no muy grandes y se calienta lentamente a fuego moderado. Si la dureza es originalmente muy grande, se aguardará la fusión completa para agregarle unos centímetros cúbicos de trementina hasta obtener que una fuerte presión de la uña del pulgar deje sólo una marca; si por el contrario, la uña del pulgar penetra sin dificultad, hay que prolongar el calentamiento el tiempo suficiente (varias horas si es necesario) para eliminar lentamente una parte de los solventes naturales. Cada cuarto de hora se retira con un cucharón una muestra que debe enfriarse durante 5 minutos como mínimo, en agua a la temperatura de la sala de pulido (20º C), antes de que pueda hacerse el ensayo de dureza.

2. ***Preparación del molde.*** Durante el caldeo de la brea se prepara un molde para las bandas de brea, de 20 mm de ancho y 7 a 8 mm de espesor. Basta con cubrir una tabla cualquiera con una hoja de papel de embalaje grueso, de superficie lisa, y clavar sobre ella varillas cuadradas de 8 X 8 mm forradas también. También sirve el papel que se le quita al “contact”. Clavar las puntillas a medias para su fácil extracción. Puede resultar ventajoso fabricar un molde bastante grande para poder colocar en una vez la brea suficiente para dos herramientas.

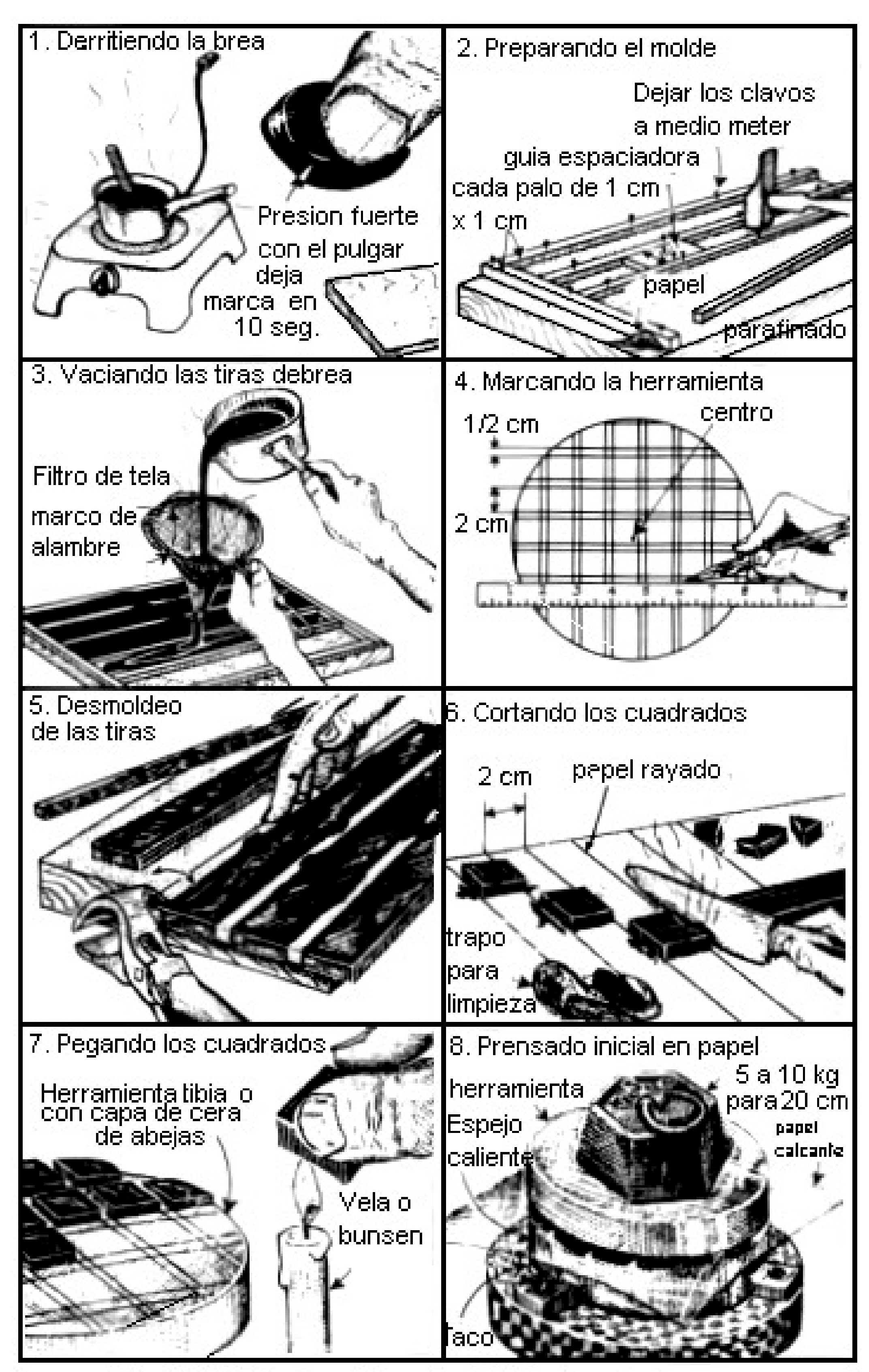


Fig 23. Fabricación de la torta de brea

3. ***Colada de las bandas.*** Se recomienda quitar las impurezas más grandes que la brea pueda contener, filtrándola por medio de un colador de tela de mallas no muy cerradas, soportado por un armazón de alambre, pero es necesario asegurarse que la brea está suficientemente caliente como para colar casi como el agua. Si la brea proviene de recuperación de herramientas anteriores que contengan rojo hay que esperar la eliminación de las pequeñas burbujas que pueda contener. El molde se coloca exactamente horizontal y en sentido longitudinal y se llena hasta el tope pero evitando desbordar sobre las varillas. si se dispone de un pico de Bunsen es fácil eliminar las pequeñas burbujas superficiales pasando la llama sobre las bandas antes de que se enfríen.

4. ***Trazado de la herramienta***. Se aprovecha el enfriamiento de la brea para trazar el emplazamiento de los cuadrados sobre la cara convexa de la herramienta de vidrio que nos ha servido para alisar. Cuando esta herramienta es gruesa y pesada se recomienda moldear sobre el espejo, provisto de una faja de papel fuerte, una torta de yeso de 4 cm de espesor para 20 cm de diámetro. Después de un secado de tres semanas como mínimo, esta herramienta puede ser protegida de la humedad por dos capas de gomalaca disuelta en alcohol. El sistema de cuadrados debe ser descentrado con referencia al contorno de la herramienta para evitar una posible causa de error sistemático.

5. ***Desmoldeo de las bandas.*** Después de un enfriamiento completo, de tres o cuatro horas cuando menos, se pueden desmoldar las bandas de brea, lo cual resulta más fácil si la brea está muy fría. Con precauciones para evitar romperlas, hay que quitar primero todos los clavos y arrancar con cierta brusquedad el papel dorsal; luego se despegan las varillas con un pequeño movimiento de rotación, un poco seco, por medio de una tenaza o pinza que tome la extremidad. Si se han forrado las varillas, es más fácil, pues se corta el forro con una cuchilla, y luego se desprende con menos peligro de romper las bandas.

6. ***Recorte de los cuadrados.*** Es muy fácil con un cuchillo bastante caliente para que no se pegue en la mitad del corte, pero no tanto para evitar la fusión en profundidad; pueden cortarse 4 ó 5 cuadrados sin recalentar ni limpiar el cuchillo.

7. ***Pegado de los cuadrados.*** La brea no se adhiere bien sino sobre un cuerpo muy seco y algo caliente; se puede entibiar la herramienta en agua caliente y secarla luego. No obstante es preferible el siguiente procedimiento empleado en el taller de la Comission des Instruments: se extiende rápidamente sobre la herramienta fría una delgada capa de cera de abejas bien caliente por medio de un pincel chato obtenido enrollando 3 ó 4 vueltas de tela en una paleta de madera. La cera se adhiere perfectamente al vidrio frío y los cuadrados de brea también se adhieren fuertemente sobre la cera fría; por otra parte, la capa de cera servirá de amortiguador para los posibles choques contra el vidrio provocados por la arista cortante que servirá para recortar los cuadrados. Para pegar los cuadrados basta exponerlos durante 3 ó 4 segundos sobre una llama de una vela, o mejor todavía, sobre la llama luminosa de un pico Bunsen, hasta que una gota de brea esté próxima a caer. Se aplica enseguida el cuadrado exactamente en su lugar sobre la herramienta, presionándolo suavemente durante algunos instantes.

8. ***Prensados*****.** El espesor de los cuadrados colocados puede variar en más de 1 mm. Una rápida nivelación con una herramienta filosa puede resultar conveniente, lo mismo que el raspado de los bordes de brea provenientes del centro del cuadrado cuando se ha empleado un cuchillo muy caliente para cortarlos. Cortar los cuadrados incompletos de los bordes de la herramienta. El primer prensado se efectúa en caliente y es más eficaz calentar el espejo en agua tibia que no pase de los 35º C sin olvidar jamás secarlo cuidadosamente antes de recubrirlo con un papel calco o de seda sin pliegues ; luego se coloca la herramienta, templada por una permanencia prolongada a alguna distancia de una fuente de calor uniforme. Con una carga de algunos kilos, el prensado puede durar un cuarto de hora aproximadamente. Dos o tres prensados bastan por lo general, pero teniendo cuidado desde el principio que los cuadrados no se achaten al extremo de tocarse, lo que tornaría la herramienta inutilizable. Este accidente puede ocurrir si la brea es más blanda de lo previsto, si la temperatura ambiente es muy elevada (30º C) o también si se han calentado sin control el espejo y la herramienta. De vez en cuando, solo uno o dos cuadrados se aproximan peligrosamente; antes de continuar el prensado, se los recortará de un golpe vertical con un formón bien afilado. Volveremos sobre esta operación que abarcará todos los cuadrados cuando la herramienta haya trabajado durante un cierto tiempo.

Cuando todos los cuadrados apoyan aproximadamente en toda su superficie (el papel calco deja una marca mate), se procede a un prensado en frío directamente sobre el espejo solamente embadurnado con una capa uniforme de rojo de pulir y agua, bastante espesa para cubrirlo. Este prensado al rojo debe ser prolongado durante una media hora como mínimo, antes de comenzar el trabajo de pulido.

Disposiciones generales para el pulido.

Indiquemos por orden de importancia, las cualidades fundamentales del local ideal para el pulido.

Temperatura cercana a 20º C. Es muy difícil amoldar la brea, para obtener un trabajo verdaderamente satisfactorio, a menos de 15º C o más de 30º C.

Constancia de la temperatura. En el hemisferio Norte, debe preferirse la exposición al norte, los muros gruesos y evitarse las corrientes de aire y la vecindad inmediata de una fuente de calor.

Conveniente estado higrométrico. Una humedad pronunciada perjudica las mojadas normales.

Aseo. Evitar los locales polvorientos o difíciles de limpiar.

Aprovechar la mejor iluminación natural posible.

Desde luego en la práctica no se reunirán jamás simultáneamente estas condiciones. No demos un rigor absoluto a estas cualidades, aunque son deseables. Por ejemplo, en un sótano la temperatura será más constante, pero tal vez nos perjudicará el frío, la humedad y el polvo. Aun a riesgo de provocar complicaciones domésticas, siempre aconsejaremos tomar la cocina como laboratorio (después de la rigurosa expulsión de su legítima locataria); se hallarán en general las comodidades máximas, tales como agua, gas, piso de fácil limpieza, etcétera. Señalamos a los más temerosos que al comienzo de los trabajos prácticos de la Comission des Instruments, se tallaron buenos espejos en condiciones muy desfavorables desde todo punto de vista, en el observatorio de la Société, directamente bajo un techo de zinc.

Antes de comenzar el pulido, llamaremos también la atención sobre los siguientes puntos:

1. La calidad del rojo de pulir es una cosa importante.

2. Prensar la herramienta durante el tiempo suficiente (por lo menos media hora a 20º C).

3. Verificar el aseo de la mesa de pulir y de la mesa accesoria (hules lavados). Es una buena precaución limitar al máximo los objetos a utilizar (espejo, herramienta, frasco de rojo y su pincel). Para limpiar y recalentar el espejo es necesario un recipiente bastante grande que permita su inmersión completa y una esponja fina reservada para el rojo. El secado y la limpieza del espejo se hace con trapos blancos bien desgastados por lavados repetidos, resultando ideal un tejido de algodón delgado como un liencillo. La herramienta puede ser lavada después de cada sesión de trabajo por medio de la esponja del rojo, suficientemente húmeda. luego se la deja secar por sí misma sin enjuagarla con nada.

4. Si la temperatura del local es un poco baja, por ejemplo entre 14 y 16º C es absolutamente necesario entibiar ligeramente, los discos pero en profundidad; para el espejo un buen medio es una inmersión durante 5 a 10 minutos en agua a 30º C seguida de un secado. Es preferible no mojar totalmente la herramienta que sería luego difícil de secar convenientemente. Bastará entibiar la brea dejándola largo tiempo ante una suave fuente de calor (lámpara infrarroja). A continuación se hará un prensado suplementario de 10 ó 15 minutos solamente, lo que permitirá recomenzar el trabajo antes del enfriamiento completo de los discos ; el calor desprendido luego por el trabajo bastará para mantener un régimen térmico suficiente (ver figura 24).



Fig 24. Sala de pulido en el taller de la Commission

Semejantes consejos para la ejecución de una superficie de alta precisión no dejarán de chocar contra el "buen sentido". Nos excusamos por insistir una vez más sobre estos factores puramente sicológicos ; no es culpa nuestra si ellos juegan un papel preponderante y tenemos el deber de tomar en consideración todos los aspectos de la realidad si deseamos verdaderamente capacitar al lector para dominar la cuestión. Conocemos de modo muy preciso, por experiencia directa y por referencias de muchos colegas, el proceso que engendra el equivocarse 99 veces sobre 100. Los espíritus temerosos y razonadores están infinitamente más expuestos a las falsas maniobras que los "prácticos", que sólo desean aceptar la lección de los hechos. Por ejemplo, la reacción instintiva de aquel que teme rayar es la de adoptar un sistema que favorece el rayado ; el resultado de un trabajo en el que se trate de evitar todas las causas de calentamiento razonado sobre las causas que no son las que determinan la forma del vidrio es, seguramente un espejo catastrófico. Una vez más : hacer un buen espejo cuando se sabe cómo hacerlo, es fácil, pero explicar lo que sucede no puede tener posibilidades de veracidad si no es razonado a posteriori.

Dicho lo cual, vamos a intentar dar una idea objetiva de las mejores técnicas fruto de una experiencia que ha madurado durante muchas generaciones de ópticos astrónomos. Esperamos que el lector tenga a bien no oponer especulaciones personales más seductoras hasta que su espejo no esté completamente terminado.

Conducción del pulido

Con un espejo de menos de 30 cm de diámetro puede trabajarse indiferentemente en la posición espejo arriba o abajo. Los resultados dependen en mucho de factores difíciles de prever anticipadamente (posición, tamaño de las manos respecto del vidrio, presiones involuntarias). Aconsejamos más bien la posición espejo abajo ; contrariamente a las creencias generalmente admitidas, la experiencia muestra que el promedio de operadores evita mejor de esta forma las anomalías del borde. En la posición espejo abajo, éste debe reposar exclusivamente sobre una mesa bien plana, con la interposición de dos redondeles de franela separados por un papel grueso ; los tacos laterales dejarán un juego suficiente para que se pueda girar el espejo fácilmente cada cuarto de hora de trabajo más o menos, con respecto a este almohadón elástico, en una cantidad sistemáticamente constante, un poco superior o inferior a un cuarto de vuelta. Este procedimiento, debido a A. Couder permite evitar radicalmente el astigmatismo, aun con un espejo muy flexible.

Las carreras a adoptarse son las normales, de amplitud 1/3 D descritas anteriormente. Es más fácil hacer carreras rectilíneas que rizos, pero siempre se tratará de evitar en lo posible toda tendencia regular variando la amplitud de los desplazamientos (alrededor del valor 1/3) y la cantidad de zig zag entre las rotaciones, de modo de no respetar sino en promedio las cifras indicadas. Un operador aislado no puede imitar perfectamente al azar (E. Borel). Nosotros obtuvimos resultados mucho más perfectos haciendo trabajar con las “mismas” carreras a 4 ó 5 personas distintas sobre el mismo espejo. A pesar de todo, el trabajo se vuelve rápidamente maquinal y suficientemente incoherente si uno no contrae desde el comienzo un hábito vicioso. Especialmente ponemos en guardia contra la tendencia frecuente de hacer girar la herramienta en el mismo lugar al final de cada carrera, o peor todavía, marcar un compás de espera en la extremidad de la misma antes de volver. Es necesario evitar toda brusquedad ; Conviene redondear ligeramente el movimiento rectilíneo antes de volver en el otro sentido, y la frecuencia de las carreras tampoco debe ser muy grande : cerca de 60 dobles carreras por minuto y todavía menos hacia el final del trabajo para limitar las causas que producen las ondas primarias.

El pulimento es más eficaz cuando se pone poco rojo y poca agua por vez ; el pequeño frasco de rojo, lleno hasta un tercio de rojo y recubierto por una capa de agua de 1 ó 2 cm permite mojar el pincel hasta el lugar deseado para mantener un buen régimen. La renovación del rojo no debe tomar más que un instante ; ni siquiera se separan los discos ; basta pintar una banda roja sobre los cuadrados (en posición excéntrica) o sobre el espejo. La duración de una mojada no excede normalmente cinco minutos ; si dura 10 ó 15 minutos significa que se puso mucha agua y rojo por vez y también que el taller es muy frío o muy húmedo. Hacia el final de la mojada aumenta considerablemente la eficacia del trabajo ; el agua escasea, el rojo se incrusta en la brea, la herramienta “afeita” parcialmente el vidrio. Insistiendo, la resistencia a los desplazamientos llega a ser enorme ; se producen ruidos agudos (en ciertos talleres industriales no pueden oírse unos a otros) y contrariamente a nuestra reacción instintiva no es en esas circunstancias cuando se producen las rayas, sino es precisamente de este modo como se rellenan las pequeñas vetas y se obtiene el mejor pulido. Pero el trabajo de la óptica astronómica requiere técnicas más suaves ; es útil,

durante una buena parte del pulimento, mantener un régimen de pequeñas mojadas un tanto duras en la medida en que se teman pérdidas de adherencia (local muy frío), pero es necesario terminar el trabajo poniendo un poco más de rojo y agua a la vez y sin secar completamente cada carga. Al comienzo del trabajo y no obstante los prensados, la herramienta está todavía mal adaptada al espejo ; se producen aferramientos y deslizamientos irregulares que deben disminuir poco a poco. Después de la primera hora de trabajo debe encontrarse una resistencia notable y regular para mover la herramienta y si no ocurre así puede procederse a un prensado suplementario con los discos algo entibiados. Al cabo de este tiempo, los cuadrados deben estar uniformemente recubiertos por el rojo y presentar una superficie mate ; si permanecen negruzcos y se rayan, es un mal síntoma que demuestra falta de rojo o poca agua o que el local es muy frío o por último, que la brea es muy dura. Si no se cuenta con una buena brea que tome bien el rojo es preferible recubrir los cuadrados con una delgada capa de cera de abejas (G. W : Ritchey) extendida fácilmente con un pincel chato de tela (ver figura 25).



Fig 25. Encerado de los cuadrados

La operación debe continuarse con un breve prensado sobre el espejo ligeramente tibio, bien seco y recubierto con papel de seda. No debe calentarse en profundidad una torta encerada a riesgo de ver la cera deslizarse como una piel sobre la brea; del mismo modo, durante el trabajo no es menester intentar secar completamente ; se mantiene un régimen de rojo y agua más abundante. Una torta encerada pule más rápidamente que una de brea desnuda, y también es más difícil que raye, pero las superficies obtenidas tienen generalmente una forma de conjunto menos regular y las ondulaciones son más importantes. El espejo se aclara desde los primeros minutos del pulido ; en la posición espejo abajo es normal que el borde “se adelante”; por el contrario, con el espejo arriba, el centro se pule más rápidamente. Se tiene entonces un medio fácil para conducir el trabajo de manera regular sobre toda la superficie invirtiendo la posición por ejemplo, cada dos horas.

El trabajo es mucho más eficaz y sobre todo mejor la forma, si se trabaja durante bastante tiempo como para que un régimen de corrientes térmicas regulares se establezca en toda la masa del espejo y la herramienta. Con un espejo de 20 cm y de 35 mm de espesor es necesario trabajar durante una hora al menos sin detenerse más que algunos instantes a cada renovación de rojo. Mejor todavía si se puede pulir durante 2 ó 3 horas seguidas, aunque la resistencia de la brea es limitada ; los cuadrados se hunden cada vez más, sus lados se vuelven convexos y amenazan tocarse, lo que es necesario evitar a cualquier precio si no se quiere inutilizar la herramienta o recurrir al método mediocre de abrir canales en la brea.

Se recortarán entonces a tiempo los cuadrados por medio de una arista cortante muy aguda y perfectamente afilada (formón de madera de no menos de 20 mm de ancho, hierro de cepillo de carpintero o de garlopa o conejo) que se dirigirá a plomo (vertical) por pequeños golpes sobre la brea que excede la línea de una regla bastante gruesa colocada bien de frente al trazado primitivo a lápiz sobre la herramienta (figura 26).

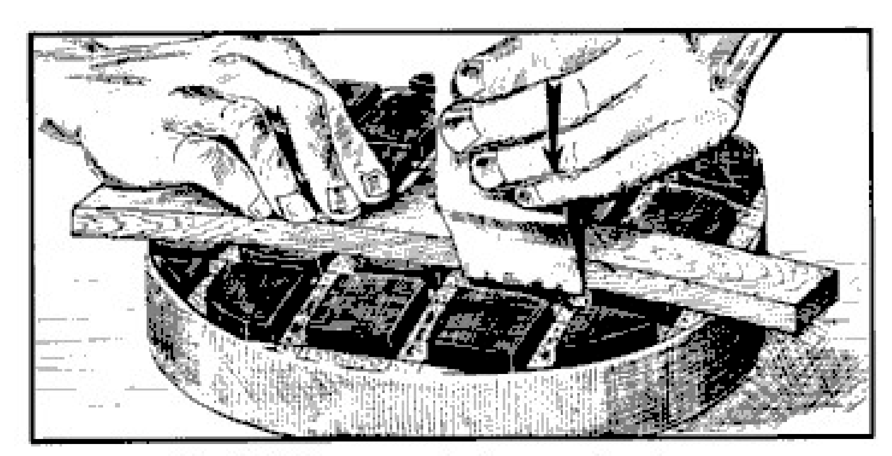


Fig 26. Recorte de los cuadrados

Se cortan así limpiamente y sin graves escamaduras, los cuatro lados de los cuadrados ; los pequeños fragmentos y el polvo de brea son cuidadosamente cepillados sobre un papel blanco para la eventual recuperación y especialmente para evitar que se peguen por todas partes en especial en las manos y en los brazos que pueden limpiarse con trementina. Después del recorte es necesario un nuevo prensado de los discos a temperatura ambiente. Puede utilizarse como caso extremo, brea un poco blanda que necesite el recorte de los cuadrados cada hora, pero si un trabajo prolongado durante 3 horas no produce ninguna deformación notable, la brea es muy dura y debe ser encerada, o mejor, rehacer la herramienta con la brea ablandada.

Después de un trabajo de 3 ó 4 horas el vidrio está pulido a medias y los cuadrados de la herramienta han sido recortados 2 ó 3 veces, son menos gruesos, pero incrustados uniformemente de rojo y sin graves defectos. Después de un tiempo suficiente se experimenta, al desplazar la herramienta, una impresión de adherencia grasa muy uniforme, capaz de dar preciosas indicaciones sobre la regularidad del trabajo. Puede decirse que todo el ser del operador participa en el conocimiento sensorial de lo que ocurre.

Si se caracterizan los progresos del pulido en función del tiempo por una estadística llevada sobre el número de picaduras por unidad de superficie se obtiene una curva (figura 27) de carácter exponencial en la región que nos interesa, lo que permite prever fácilmente que las últimas picaduras de esmeril costarán “caras”. Un espejo muy pequeño trabajado racionalmente no requiere sino 4 horas de pulimento para dar completa satisfacción con los medios corrientes de control, pero ni un tiempo doble bastará generalmente para un espejo de 20 cm.

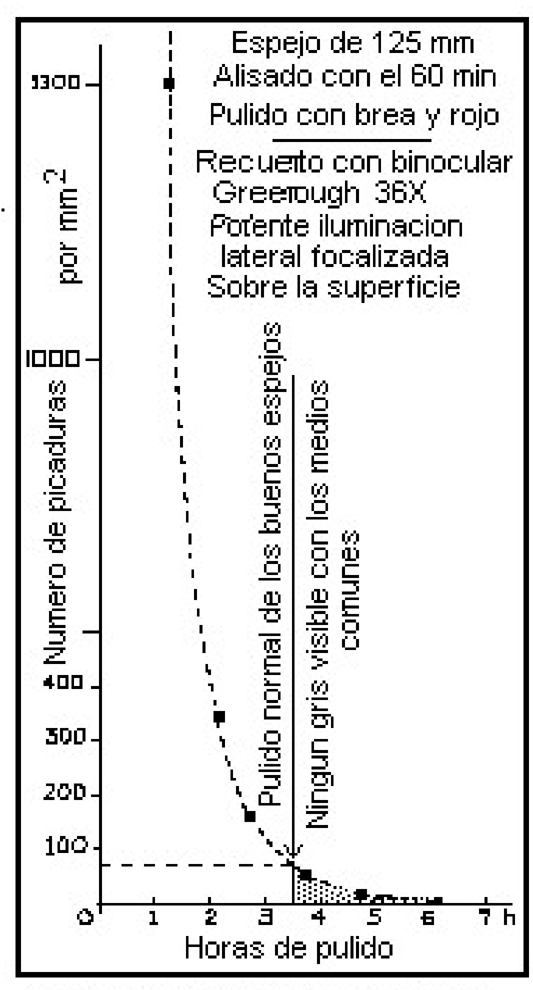


Fig 27. Progreso del pulido en función del tiempo

Acomodando cuidadosamente la vista, se comprobará al cabo de este tiempo, sobre la superficie del espejo y cerca de la imagen reflejada sobre un fondo negro del filamento de una lámpara eléctrica, la presencia de un velo “gris” constituido por una multitud de pequeñas picaduras de esmeril (aquellos que no son muy miopes utilizarán una buena lupa). Según que el “grisado” sea más notable en el centro que en el borde, se sabrá si es necesario continuar el trabajo con el espejo encima o debajo. Es normal, para una superficie astronómica de 20 cm, ocupar unas 15 horas para obtener sobre la base de ese control un pulido aparentemente total; esto representa cuando menos 3 días enteros de trabajoviii[1] debido a las pérdidas de tiempo en los prensados, etcétera. Si no se dispone de días enteros o de medios días, hay que evitar disponerse a pulir por lo menos de una hora continuada.

Cuando el alisado del espejo no ha sido totalmente logrado por una u otra razón, un trabajo de 30 horas y aún más no basta para eliminar totalmente el “grisado” algo particular que subsiste todavía formado por picaduras bastante grandes, pero muy diseminadas, que pueden considerarse como no pulimentables. El principiante a quien seguramente le ocurrirá esta desventura no debe desolarse por ello ; un poco de “gris”, de vetas y aún de verdaderas rayas si no son muy gruesas o muy numerosas, prácticamente no perjudican la figura de difracción ; es necesario considerar ciertamente, la cantidad de luz que estas fallas difractan, despreciable frente a la energía total, salvo en los casos muy particulares (observaciones de la corona solar, de ocultación de estrellas muy débiles por un astro brillante, del compañero de Sirio, etcétera). Recordamos a los irreflexivos que las cuatro láminas que soportan el espejo secundario juegan exactamente el mismo papel que 4 enormes rayas sobre el espejo ; no obstante, todos las aceptan sin inconvenientes ; por otra parte, aquellos que hablan del “gris” con severidad, harían mejor en comenzar por quitar cuidadosamente el polvo de sus objetivos.

Fin del pulido

Debemos distinguir dos casos : Primero el del aficionado modesto que desea simplificar su trabajo lo más posible y se contenta con un espejo de 150 mm, de foco suficientemente largo para que la parabolización sea innecesaria. Si los principios antes enunciados han sido bien comprendidos y efectivamente aplicados, el aficionado podrá en rigor evitar cualquier control y tener algunas probabilidades de obtener al primer intento un espejo esférico utilizable.

El caso del aficionado que anhela obtener un espejo irreprochable es mucho más interesante. No se puede contar con obtener automáticamente con cierta certeza un paraboloide de 20 cm a f/D = 6 ; los controles ópticos y los retoques son indispensables. No es aconsejable para un novicio examinar su espejo en el aparato de **Foucault**, antes de terminar completamente el pulido. Efectivamente, si comprueba que la forma obtenida es buena, no se atreverá a continuar el trabajo y se contentará con un espejo muy "gris" o bien si observa un defecto, intentará un retoque prematuro y generalmente desgraciado, seguido de otros más desastrosos. A partir de este momento, el operador está perdido ; su espejo no estará jamás ni bien pulido ni con forma realmente satisfactoria, mientras que un trabajo regular, bastante prolongado como para hacer una herramienta impecable, habría nivelado todo automáticamente con una forma fácil de parabolizar con gran seguridad. Personalmente guardamos un vivo recuerdo de nuestro primer espejo, un 250 mm a f/D = 7 pues no logramos el cuarto de onda sobre 220 mm sino al precio de 80 retoques a lo largo de 20 días de trabajo. En la correspondencia de la secretaría de la Comission se encuentran muchos ejemplos de colegas que hablan de 200 horas para dar forma a uno de 16 cm. Deseamos evitar a nuestros colegas semejante prueba de perseverancia ; por cierto, si se aprovechan correctamente los principios dados aquí, un espejo pulido estará casi terminado. Nunca se apreciará lo bastante la importancia de obtener una forma muy regular, de primer intento.

Generalidades sobre los medios de control

Un defecto material sobre el vidrio y las anomalías correspondientes sobre la onda y sobre la imagen son aspectos distintos de la misma realidad física y la medida de una de ellas permite calcular las restantes ; pero estas dimensiones distan mucho de ser del mismo orden. Mientras que los defectos materiales del vidrio o de la onda se expresan corrientemente en centésimos de micrón o en mili micrones, los apartamientos que resultan sobre la imagen se miden en micrones enteros en el sentido transversal y en milímetros en el sentido longitudinal (figura 28).

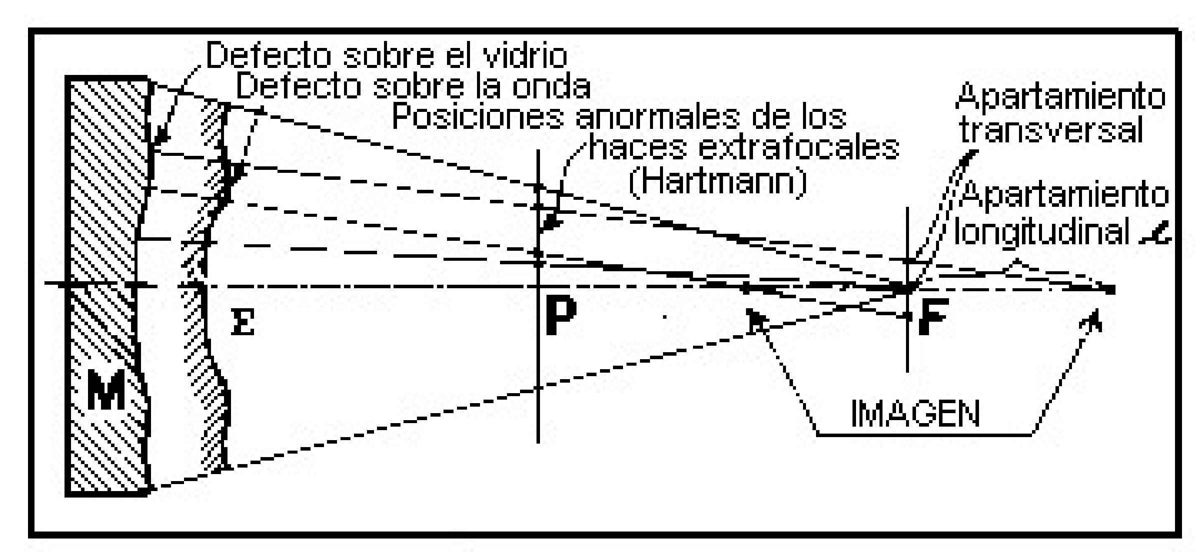


Fig 28. Principales métodos que se utilizan para medir un defecto

Es natural que se tendrán muchas más facilidades para determinar el defecto con una buena precisión relativa, si se intenta la medida de su aspecto más accesible. Esta observación nos permitirá elegir fácilmente el método más seguro, particularmente para el aficionado desprovisto de piezas de referencia.

Revista rápida de los principales métodos de control

Los métodos basados en medidas directas sobre el vidrio serán descartados enseguida ; evidentemente, no es posible pensar en un comparador de contacto mecánico u óptico por perfecto que sea. Los calibres interferenciales, muy empleados en la industria y sobre los cuales volveremos a propósito del pequeño espejo plano, no se emplean formalmente para el control de un vidrio astronómico de 20 o más cm de diámetro. Este método constituye, por otra parte, un círculo vicioso.

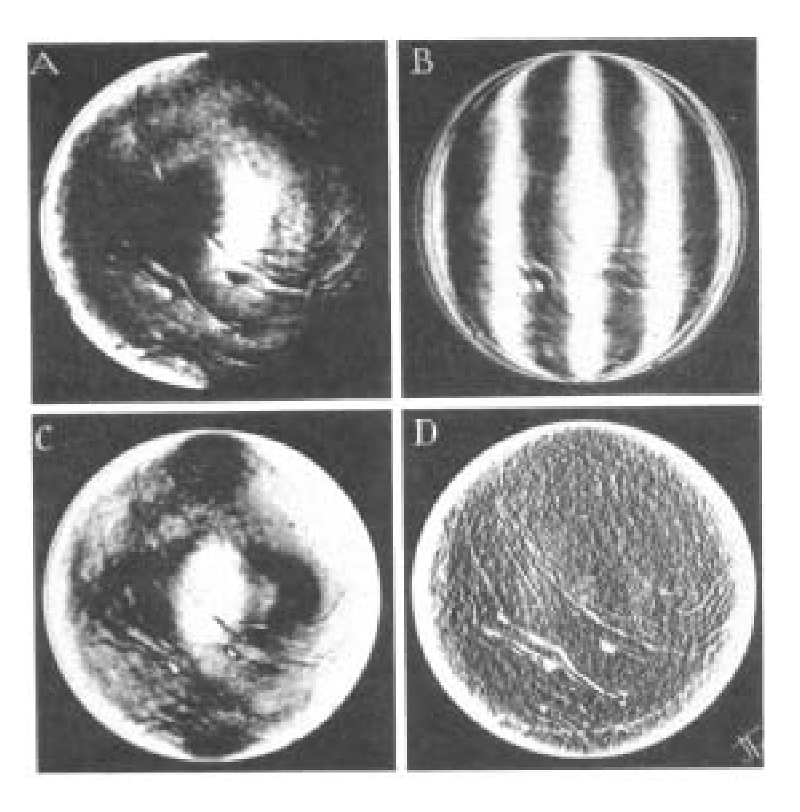
Los métodos ópticos dirigidos a la medida de los defectos sobre la onda son ya más serios. Un interferómetro de Michelson Twyman de suficiente tamaño puede resultar útil, pero evidentemente no es cuestión de intentar aquí su empleo, puesto que costaría muchos miles de veces más caro que nuestro espejo. El método de Michelson, por el contrario, no exige ninguna costosa pieza de referencia. Se verifica directamente la esfericidad de la onda por medio de un diafragma con dos aberturas, una de las cuales, fija, está en principio en el centro, mientras la otra explora la superficie del espejo. Estas dos aberturas relativamente pequeñas dan una gran mancha de difracción estriada por franjas de interferencia (agujeros de Young). Si el camino óptico no cambia cuando el orificio móvil explora el espejo, la franja central de este sistema permanece fija ; en caso contrario sus desplazamientos dan inmediatamente las diferencias de fase. Pero considerando los defectos que nos interesan, las cantidades a medir resultan muy pequeñas, del orden de un micrón a lo sumo y por ello no se puede esperar una aproximación suficiente en las medidas, por la poca estabilidad de los soportes y la insuficiente precisión de las mediciones realizadas con el microscopio.

León y François Lenouvel han indicado un método que posee las ventajas de las medidas interferenciales directas sin sus principales inconvenientes. Las interferencias se producen por medio de un duplicador de Michelson o de un birrefringente de Wollaston unido a nicoles ; el duplicador ubicado en la vecindad inmediata de la imagen es de pequeñas dimensiones, pero aún continúa siendo una pieza costosa y poco corriente para un aficionado.

Los métodos de control sobre las imágenes son, pues, los más importantes en la práctica. La observación directa de las figuras de difracción focales y extrafocales se conocen si duda, desde que comenzaron a usarse los instrumentos. Ha sido desarrollada y descrita en un folleto editado por la Casa Cooke y es muy útil al observador, pero resulta de interés limitado para el óptico, puesto que no establece claramente el lugar y la magnitud de los defectos.

El método Hartmann permite determinar las posiciones longitudinales de intersección de los pinceles luminosos aislados por un diafragma colocado delante del espejo y dispuestos simétricamente con respecto al eje, por medio de dos fotografías extrafocales que pueden medirse luego con gran precisión. El método da indicaciones muy seguras e indiscutibles, pero es un recurso solo aplicable al control final de grandes piezas. Los aficionados adelantados que intenten el control de un espejo de 50 cm sacarán

provecho estudiando el magnífico ejemplo de aplicación de este método, utilizado en el control del espejo de 81 cm del observatorio de Haute Provence y publicado en Lunettes et Tèlescopes. A **León Foucault** se le deben los métodos de control más útiles para el óptico, de los que derivan casi todos los otros métodos sobre las imágenes. El método de la hoja de cuchillo o de las sombras es el más maravilloso de todos por su sensibilidad y su simplicidad. Más adelante nos ocuparemos en detalle. Por el momento digamos solamente que un simple diafragma opaco de bordes netos, interceptando el haz en la vecindad inmediata de la imagen evidencia, para un ojo colocado detrás, los apartamientos transversales de los rayos aberrantes por medio de sombras sobre el espejo, y sugiere al observador una sorprendente visión en relieve de los defectos, tal como podría verlos con una iluminación rasante si la altura de estos defectos fuera un millón de veces mayor (figura 29A). La densidad de la sombra está en relación con la pendiente que forma la superficie de la onda real con la esférica ideal que tendría su centro en el plano de corte del cuchillo. Si se desea medir la altura de los defectos, es necesario anotar todas las pendientes por pequeñas fracciones, es decir, proceder a una integración ; pero esta operación, con un espejo chico, sólo es útil una vez terminado totalmente, con el objeto de asegurarse que los defectos residuales son muy inferiores al límite perjudicial. En realidad, durante el trabajo y con un poco de práctica, basta una simple ojeada a las sombras para que el óptico obtenga con precisión las indicaciones necesarias para realizar un buen retoque ; mientras que la simple enumeración de la cantidad de mili micrones a rebajar en tal lugar tendría un valor práctico casi nulo. En efecto, este último método no permitiría elegir ni la herramienta conveniente ni determinar la duración del trabajo, ni las carreras a emplear. Es importante insistir sobre este punto, puesto que la mayor parte de los juicios que se pueden leer sobre los métodos de control están dados por teóricos que jamás han tallado un sólo espejo con sus propias manos.



El método de la red extrafocal, debido también a **León Foucault** ha sido retomado y desarrollado más tarde por V. Ronchi y L. Lenouvel. Se trata de interponer en el haz y cerca de la imagen, una red de trazos opacos iguales a los intervalos. Si el haz es homocéntrico, las sombras creadas por este múltiple cuchillo son rectilíneas ; en caso contrario, las regiones aberrantes son visibles por las correspondientes anomalías (figura 29B). Desgraciadamente, a partir de un pequeño número de trazos por milímetro en la red, se producen intrincados fenómenos de interferencia parásita cuya interpretación clara y segura no resulta fácil. No hay que extrañarse, pues que no obstante los volúmenes publicados sobre esta teoría, el método no haya entusiasmado a los prácticos ; sin embargo, rinde importantes servicios para el control rápido del anastigmatismo de objetivos fotográficos y de otras pequeñas piezas corrientes que pueden controlarse con redes muy poco cerradas y extensas fuentes de luz.

F. Zernike imaginó una derivación asombrosa y magnífica del método de **Foucault**, rehaciendo la teoría del método de las sombras y teniendo en cuenta la naturaleza ondulatoria de los rayos luminosos. Esta vez, en lugar de un cuchillo opaco, se superpone a la imagen de difracción una lámina de fase bastante pequeña y del espesor deseado para producir un desfasado de 90º únicamente en la imagen central. Si el espejo posee defectos capaces de enviar luz fuera de esta imagen y formar espectros laterales, se producirá entonces una interferencia parcial entre estos espectros y la imagen central desfasada, que indica las variaciones de fase de la onda por medio de variaciones de intensidad y de matices muy vivos (figura 29C). Esta figura no puede dar sino una idea muy incompleta del método ; nosotros hemos obtenido fotografías directas en colores que lamentamos no poder reproducir aquí. El método es susceptible de aplicaciones extremadamente importantes en microscopía. Para el control de la óptica astronómica su interés es más limitado. Su interpretación correcta y segura exigiría un conocimiento muy profundo de la forma en que se produce la diferencia de marcha de $\lambda/2$ de los rayos que pasan por un foco.

Mencionemos por último, si bien ello interesa solo indirectamente al aficionado constructor de espejos, la aplicación del contraste de fase ideado por B. Lyot para el estudio de pequeños defectos muy poco pronunciados (algunos Angstroms y muy poco extendidos : algunos décimos de milímetro). Evidentemente estos defectos no son capaces de provocar una aberración geométrica, pero al menos perjudican en ciertos casos. En efecto, no obstante su débil pendiente ($1x10^{-6}$) perfectamente comparable con el de un gran defecto óptico ordinario, sus dimensiones laterales son suficientemente pequeñas como para que puedan difractar por todo el campo una cantidad no despreciable de luz fuera de la mancha de difracción y crear una luz parásita más grave que la producida por defectos de abrasión, visibles directamente sin artificios (rayas del pulido).

El método impone el desfasado y la absorción simultánea de la imagen central, pero esta vez la fuente es mucho más ancha. No se trata de estudiar los defectos de período largo ; el método es selectivo y no muestra más que los defectos que pueden enviar la luz suficientemente lejos como para caer fuera de la lámina de fase (figura 29D).

Todos los métodos que imponen la introducción en el haz y cerca de la imagen, de un obstáculo, completamente opaco o no, son realizables con montajes muy parecidos. De este modo, la red fotográfica de 5 trazos por milímetro que permitió tomar la fotografía 29B

hubiera permitido también la aplicación de los cuatro métodos, aunque en condiciones no del todo óptimas : **Foucault**, normal con un sólo trazo en el foco ; Ronchi (fotografía 29B) ; Zernike, aprovechando el desfasado producido en un sólo trazo por la variación del espesor y quizá del índice de la gelatina de la placa expuesta ; por último, Lyot, ensanchando la fuente. El efecto se diferencia de marcha causado por los trazos se reconoce además sobre la fotografía 29B en las sombras parcialmente opacas.

Explicación geométrica del método de Foucault

Coloquemos el espejo sobre un soporte de tal modo que su eje quede horizontal y coloquemos en la proximidad de su centro de curvatura , una “estrella artificial” (“S” de la figura 30) es decir, una fuente de luz cuya dimensión transversal sea muy pequeña. El espejo pulido, pero todavía no metalizado, refleja bastante luz como para dar una imagen I de S suficiente para realizar el control. Si la fuente coincidiera exactamente con el centro de curvatura, la imagen de retorno se confundiría con ella y sería inaccesible. Separémosla pues, un poco hacia el costado ; en virtud de las leyes fundamentales de la reflexión, la imagen se aleja simétricamente con referencia al eje. Coloquemos el ojo inmediatamente detrás de la imagen I ; si el haz no es demasiado abierto, como es el caso de los espejos que nos interesan, se ve la superficie del espejo total y uniformemente luminosa. Ahora hagamos penetrar en el haz reflejado y exactamente delante del ojo una pantalla opaca rectilínea, de bordes netos, llamada cuchillo. Estableceremos como convención general que la fuente ha sido alejada hacia la izquierda y que el cuchillo se acerca por la derecha, estando frente al espejo. Supongamos ante todo que estamos examinando un espejo perfectamente esférico ; puesto que la fuente está en la vecindad inmediata del centro de curvatura, todos los rayos se cruzan en el mismo punto I. Cuando el cuchillo penetra por delante de la intersección (figura 30A) se ve una sombra que avanza sobre la superficie del espejo en el mismo sentido que él; por el contrario, cuando el cuchillo está detrás (figura 30B) la sombra se desplaza en sentido inverso oscureciéndose primero el borde izquierdo. Pero si el cuchillo corta exactamente en la intersección I (figura 30C), debido a que todos los puntos de la superficie del espejo contribuyen igualmente a la formación de la imagen, se verá oscurecerse el espejo progresiva y uniformemente, puesto que en realidad la fuente tiene un ancho finito y la óptica geométrica no es sino una aproximación. Se tiene así un medio muy sensible para colocar el cuchillo longitudinal y exactamente en el plano de la imagen ; basta comparar, en el curso de un corte el brillo de los lados izquierdo y derecho del espejo. Si el borde derecho es un poco más oscuro, es preciso alejar ligeramente el cuchillo ; en cambio se lo aproximará si el borde izquierdo es el más negro. Rápidamente se logra hallar una posición de extinción con un “matiz uniforme” : el cuchillo se halla en la intersección de todos los rayos de luz.

Pero con frecuencia, el espejo no es completamente esférico. Observemos ante todo que, considerando la forma en que ha sido trabajado el espejo, los defectos engendrados son siempre casi exactamente de revolución (excepto los pequeños accidentes ondulados que se deben a la estructura de la herramienta o a otras anomalías muy raras), es decir, que se presentan como zonas hundidas o levantadas concéntricas al borde del vidrio. En la figura 30D hemos supuesto que el cuchillo está en el plano imagen formado por una extensa corona esférica de un espejo defectuoso. Esta corona aparece entonces con un “matiz uniforme” pero con relación a ella, existen en los bordes y en el centro del espejo regiones cuyos radios de curvatura son un poco más largos y los rayos reflejados por esas zonas no convergen exactamente hacia el mismo punto y por lo tanto no pueden ser interceptados por el cuchillo al mismo tiempo que el resto ; aquellos que provienen de “laderas” vueltas hacia el cuchillo son evidentemente detenidos primero y en consecuencia se ven las regiones en cuestión oscurecerse más rápidamente ; por el contrario, las laderas inclinadas en la dirección opuesta permanecen iluminadas hasta el último momento. El aspecto que se

observa con una penetración media del cuchillo es el de la figura 30D, cuyas sombras sugieren el relieve de los defectos con respecto a la esfera de referencia que aparece con un matiz uniforme. Falta solamente establecer una convención de iluminación para saber si se trata de una protuberancia o de una depresión ; cuando se examina un espejo debemos asimilar el aspecto observado a un relieve difusor de luz, iluminado por una fuente colocada en forma muy oblicua del lado opuesto al cuchillo (es precisamente al revés en el caso de un lente). Según nuestra convención, las laderas vueltas hacia la izquierda son las iluminadas ; las inclinadas hacia la derecha están en sombra. En la figura 30D debemos ver una protuberancia central y el borde rebajado ; en la figura 29A hay un hoyo central, una pequeña zona intermedia sobresaliente (parcialmente oculta por otro defecto más grave) y borde rebajado.

Es natural, que el aspecto de las sombras cambia totalmente según la posición longitudinal del corte. Por ejemplo, con el mismo espejo que da las sombras de la figura 30D, si se retira un poco el cuchillo del espejo colocándolo en el plano de la imagen dada por los rayos centrales, es el centro del espejo el que se ve con un matiz uniforme y la corona como las laderas interiores de un cráter o de un embudo. Cuando se retoca un espejo, importa poco que resulte una superficie con un radio de curvatura ligeramente más largo o más corto. Elegiremos evidentemente el aspecto del defecto que en tamaño y posición, resulte más fácil retocar, pero el relieve más débil no resultará necesariamente para esta posición del cuchillo. Tendremos ocasión de presentar ejemplos.

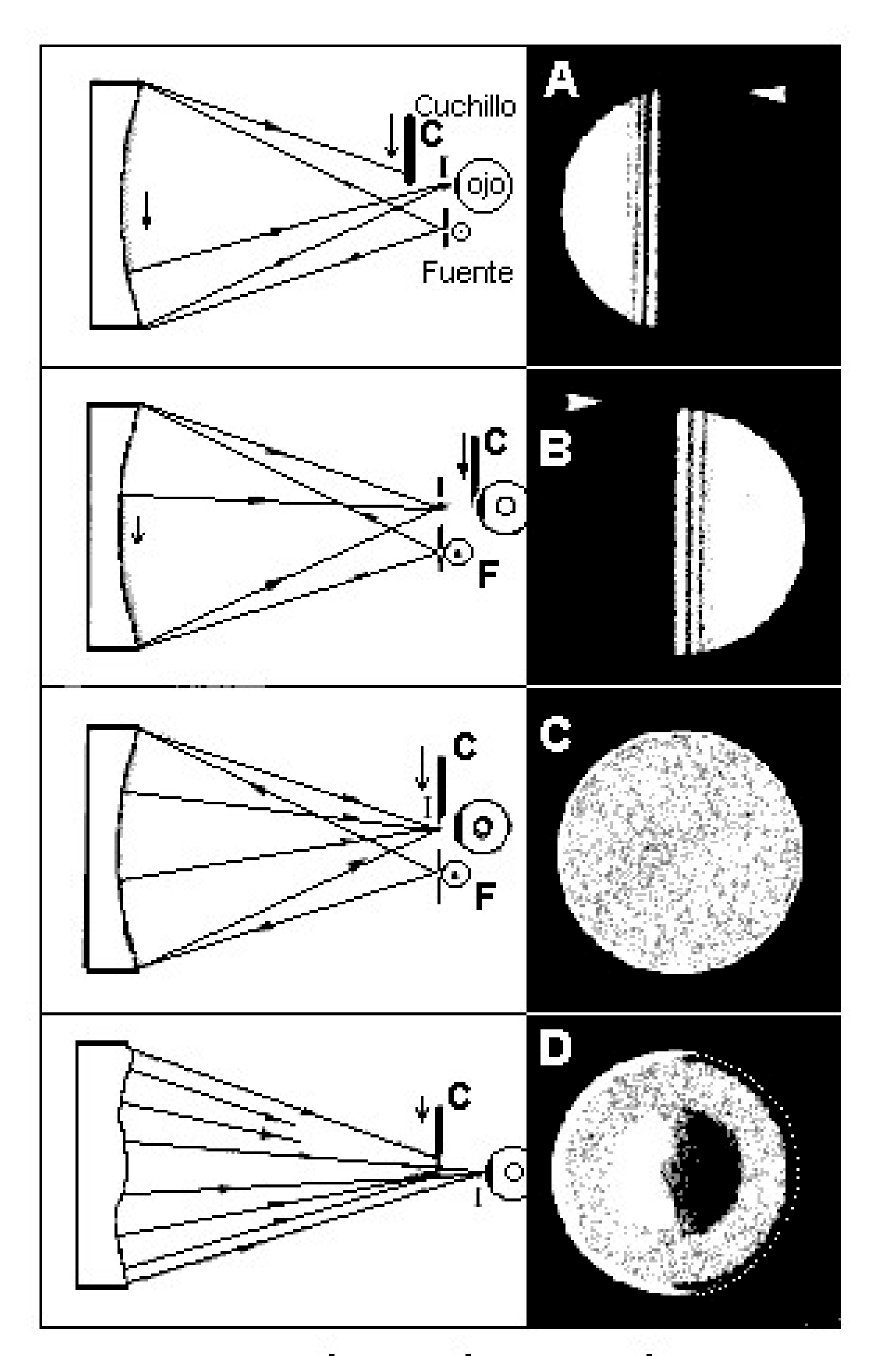


Fig 30. Explicación geométrica del método de Foucault

Detalles de construcción de un aparato de Foucault

Si bien es cierto que un montaje rudimentario, improvisado con los elementos disponibles, es capaz de rendir importantes servicios, es mucho más cómodo para el control cuidadoso de los paraboloides, disponer de un aparato con cuchillo provisto de movimientos lentos en sentido transversal y longitudinal.

La figura 31 representa un modelo derivado del que construimos en 1946 para el taller de la Comission des Instruments. Llamamos especialmente la atención sobre los siguientes puntos:

Grados de libertad del cuchillo

Para lograr fácilmente de modo suave y sin juego, los dos movimientos del cuchillo, hay que recurrir a una concepción cinemática : siendo 6 el número de puntos de contacto que definen la posición de un cuerpo respecto a otro (Maxwell), debemos tener en nuestro caso 4 puntos no regulables. Estos son (figura 31), los contactos de las dos chapas en V del carrito, mantenido por efecto de su propio peso contra la varilla de acero cilíndrica de la base. El peso del carrito se aplica además, en un quinto contacto, representado por la punta del tornillo calante sobre un vidrio plano dispuesto sobre la base, paralelamente a la varilla de acero. Accionando este tornillo se inclina ligeramente todo el carrito y se hace penetrar suavemente el cuchillo en la imagen, sin juego y sin tanteos previos, aun con un tornillo de cualquier clase de rosca. De hecho, el movimiento del cuchillo no es exactamente rectilíneo y la intersección de la imagen de una rendija no se hace rigurosamente al mismo tiempo en toda su altura, pero con el radio elegido y los anchos de las fuentes usuales este defecto no es apreciable.

Un resorte tira del carrito longitudinalmente sobre el sexto y último punto de contacto, que es la extremidad redondeada de un tornillo “micrométrico” (un simple trozo de varilla con roscado ordinario de 6/100) cuyo tambor, dividido en 100 (recuperación de un goniómetro de artillería) o en 20 y aún en 10 (banda de papel pegada alrededor), permite medir los desplazamientos del carrito con aproximación de casi 1/100 de milímetro.

Distancia transversal del cuchillo a la fuente

Debe ser pequeña para evitar en lo posible el astigmatismo del montaje (y disminuir la paralaje si más tarde se destina el aparato para controles por autocolimación. El tamaño de los bombillos comunes no permiten bajar esta distancia a menos de 30 mm sin emplear un pequeño prisma de reflexión total, pero esta solución no es realmente necesaria si no se trata de un espejo de radio muy corto ($R < 1$ m) o muy abierto ($f/D < 4$).

Fuente de luz, estrella artificial

La sensibilidad óptima del método de **Foucault** se obtiene con fuentes suficientemente intensas cuyo ancho sea del orden del diámetro de la mancha de difracción es decir de 8 a 10 µm para los espejos que nos interesan (en el centro de curvatura), aunque resulta notable que una fuente 10 veces más ancha sea todavía muy suficiente para los controles corrientes. Muy a menudo basta con un simple agujero redondo hecho en una delgada lámina de estaño o aluminio con una fina aguja (la penetración se limita a la punta, colocando la hoja a perforar contra una superficie plana de dureza suficiente), obteniéndose con facilidad agujeros de aproximadamente una centena de micrones de diámetro (1/10 de mm) No es fácil practicar un agujero bien redondo de menos de 50 µm y puede ocurrir que la luz resulte insuficiente con semejante fuente ; además, en la visión estenopeica los defectos de los medios refringentes del ojo son perjudiciales por las sombras móviles que producen. A. Couder[2] ha señalado la importancia de emplear una rendija cuyo ancho pueda ser reducido al valor óptimo y su altura útil a 4 mm aproximadamente, permitiendo obtener bastante luz y eliminar los inconvenientes de la visión estenopeica. Damos aquí (figura 31) un modelo de rendija de ancho fijo que se puede ajustar si así se lo desea de 5 ó 10 µm de separación con un error de paralelismo inferior al micrón por simple apreciación de la luz diurna a través de un difusor blanco bien iluminado. Semejante rendija es muy estrecha para los ensayos corrientes y los fenómenos de difracción, sobre los cuales volveremos, que amenazarían desorientar a los debutantes ; a falta de una medida directa con el microscopio se hará el ajuste delante de un difusor blanco muy poco iluminado, para obtener una rendija de aproximadamente 30 a 50 µm de ancho.

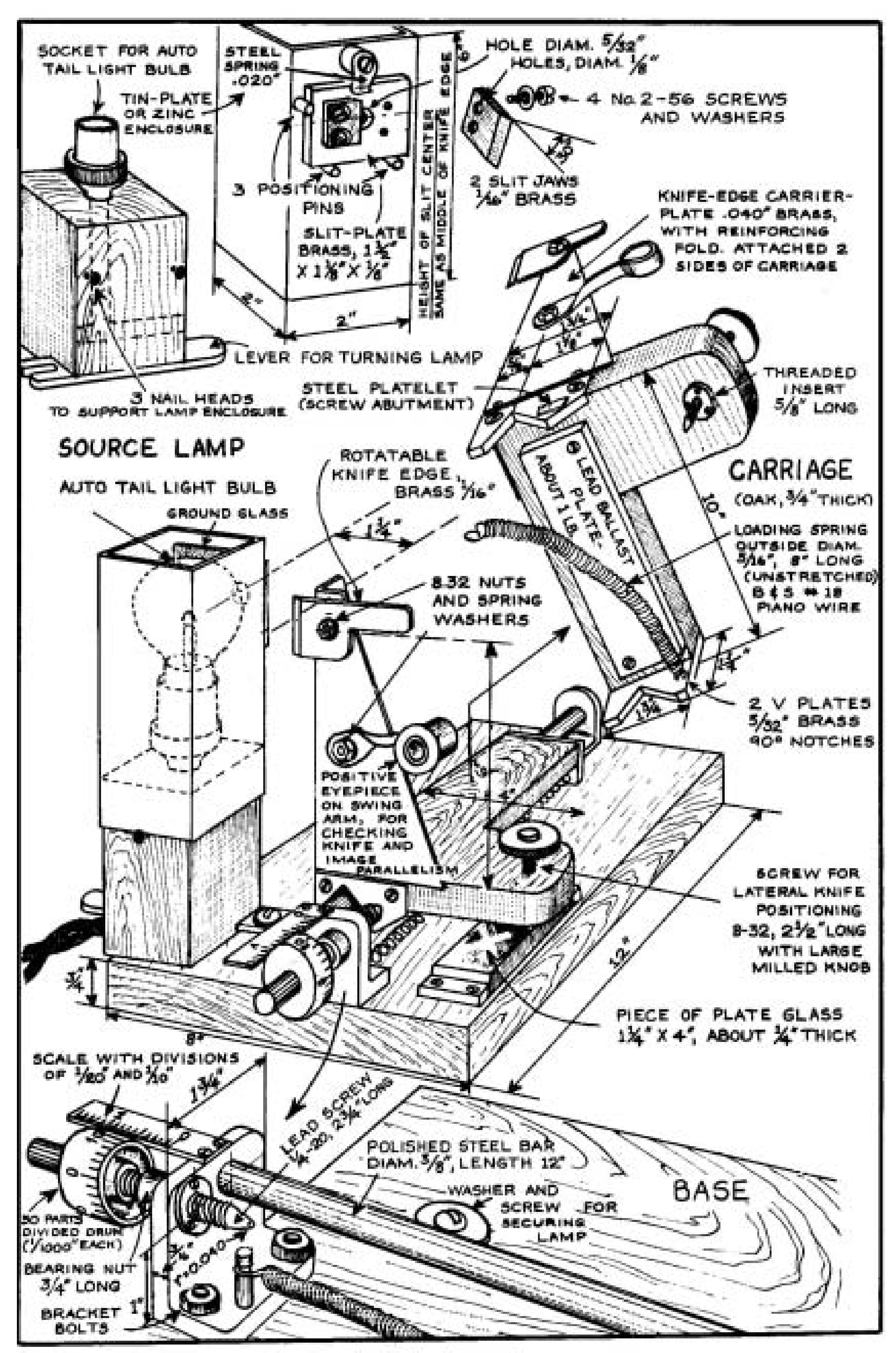


Fig. 31. Details of the Foucault test apparatus.

Todo esto es en la suposición de que los bordes de la rendija sean rectilíneos con gran aproximación. Tenemos ideas a menudo falsas, sobre la posibilidad de obtener piezas mecánicas rectilíneas con una aproximación de casi una fracción de micrón, y por lo tanto no creemos inútil describir la aparentemente infantil operación que debe realizarse para obtener los bordes de la rendija y la arista del cuchillo. El error más frecuente consiste en tratar de conseguir un diedro muy agudo, una verdadera arista cortante de navaja ; por el contrario se trata de una pequeña faceta que puede tener 1/10 de mm de ancho y puede obtenerse fácilmente bien rectilínea. No obstante su menor dureza, el latón es preferible al acero ordinario a causa de la oxidación. Se comienza por hacer, aproximadamente en escuadra, la parte que dará la arista ; luego se le hace un chanfle a 30 ó 45º simplemente con una lima, teniendo la pieza en una prensa, y esmerándose lo más posible para lograr simultáneamente una arista aguda en toda su longitud. Desde luego con un metal blando y las inevitables torpezas, esta arista resulta dentada ; para nivelarla exactamente se apoya la pieza perpendicularmente contra un vidrio esmerilado plano[3] (figura 32), seco y adecuado, con la presión de algunas centenas de gramos, haciendo unas 10 carreras de vaivén, transversalmente a la longitud de la pieza. En pocos segundos se obtiene un pequeño bisel brillante que no debe presentar interrupciones que significan asperezas no eliminadas (en este caso basta hacer algunas carreras más).



Fig 32. Arreglo de los labios de la rendija y del cuchillo

Una llama estable de algunos milímetros de largo, en un ángulo suficiente, basta para la iluminación uniforme de tal rendija, mejor si está colocada cerca de esta abertura ; los ópticos antiguos empleaban comúnmente una pequeña lámpara a kerosene, dando excelentes resultados el acetileno debido a la temperatura de su llama superior a los 2.200º C. Pero es infinitamente más práctico usar un pequeño bombillo provisto de un difusor ; el vidrio opal resulta perfecto pero disminuye mucho el brillo, bastando en la práctica con esmerilar el lado del bombillo vuelto hacia la rendija con un poco de carborundum 280 y un pequeño trozo de plomo aproximadamente moldeado en forma cóncava con el radio del bombillo. Los bombillos de bajo voltaje utilizados en los faros de automóviles o cine, son ventajosos por su reducido tamaño y la mejor utilización del filamento. Es preferible no intentar proyectar la imagen del filamento sobre la rendija por medio de un sistema óptico ;

la experiencia enseña que de esta forma es difícil obtener una iluminación bien uniforme y suficiente para todo el cono. No obstante, este método da buenos resultados con una fuente directa, tal como un arco a vapor de mercurio a alta presión cuyo elevado brillo es precioso para controles rigurosos de muy pequeños accidentes, pero que no interesan todavía al aficionado de primer grado. Notemos por último, que debe existir la posibilidad de hacer girar sobre sí misma la caja que contiene la fuente, con el objeto de uniformar lo mejor posible la iluminación en el haz útil.

Rigidez de los soportes

Felizmente tiene mucha menos importancia que con los métodos de Michelson o Zernike, aunque naturalmente las observaciones son más fáciles y rigurosas con un equipo estable. Los soportes para los espejos construidos por los aficionados son a menudo defectuosos y pueden producir deformaciones mecánicas a las piezas bajo control ; también aquí debemos recurrir a un concepto cinemático y tomamos de los montajes de A. Couder algunas de las disposiciones siguientes, que son tan eficaces como poco onerosas de realizar. El espejo apoya en dos puntos de su borde separados entre 60 y 90º sobre las gualderas del soporte de la figura 33, cuyas aristas han sido rebajadas ligeramente, de modo que el espejo descansa contra el apoyo vertical, cuyo plano está definido por las cabezas de tres clavos introducidos a medias. También el soporte debe apoyar en 3 puntos sobre un armazón sólido que apoye directamente en el suelo si se trabaja en un sótano o empotrado en un ángulo de la pared si el local es un piso de la ciudad. El aparato de **Foucault** se coloca sobre un amplio y firme trípode con preferencia de altura variable, que permita hacer todos los ajustes rápidamente, sin quitar la vista de la imagen ni tocar ni el soporte ni el espejo.

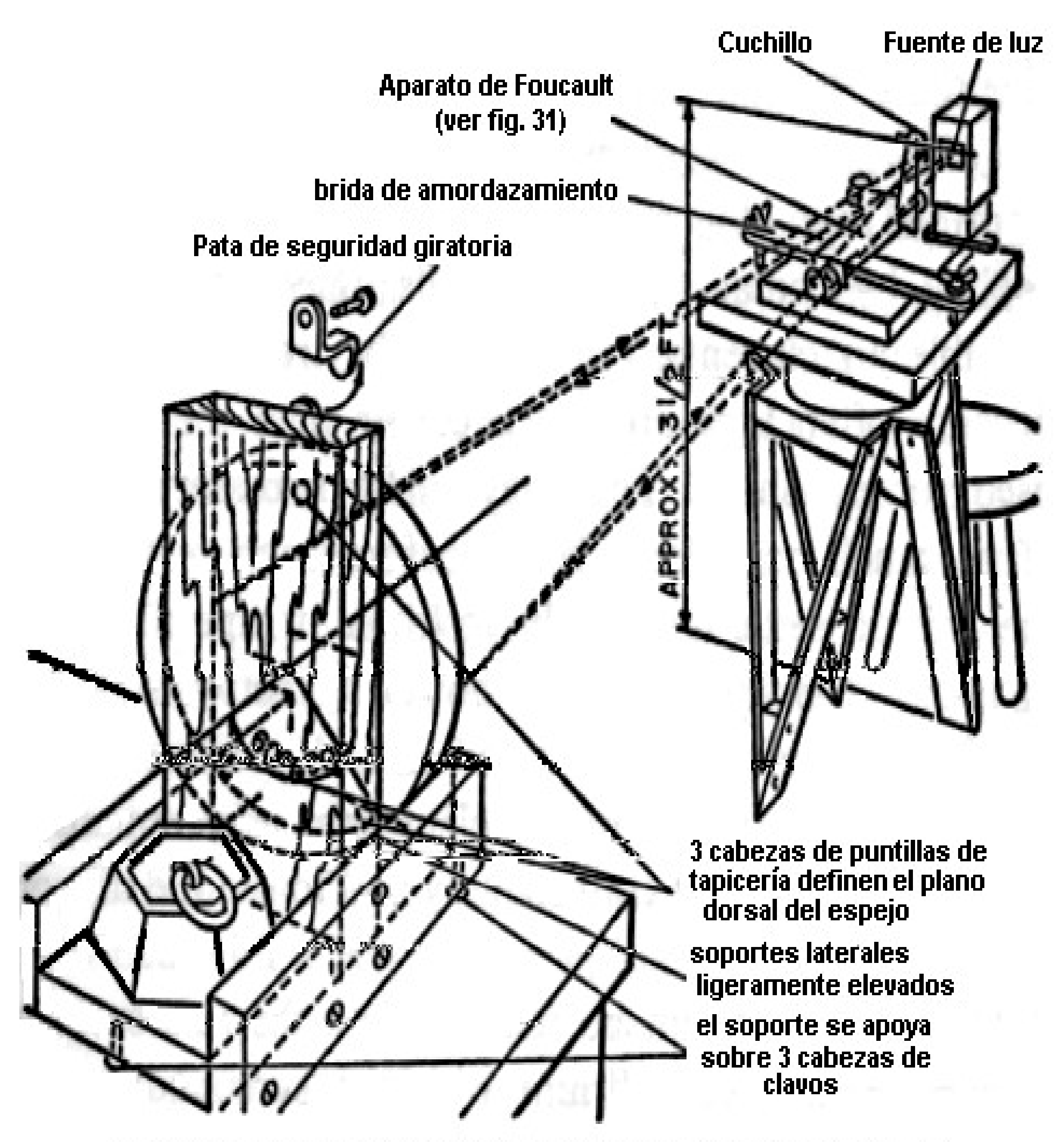


Fig 33. Disposición general para el control de un espejo

Práctica de la prueba de Foucault

Debe trabajarse en un local cerrado y con suficiente aislación térmica para evitar en todo lo posible la heterogeneidad óptica del aire. Los sótanos son por lo general, los mejores sitios, excepto en invierno, cuando el calor desprendido del observador y de la fuente de luz, producen corrientes cálidas que se enfrían al contacto con las paredes. Este lugar es también algo inconveniente por la diferencia de temperatura que generalmente existe con respecto al lugar de pulido, y el espejo necesita entonces varias horas para hallar su equilibrio térmico antes de cada prueba. Si se trabaja en una casa se elegirá una habitación cuyos muros no estén expuestos directamente al sol. Conviene una oscuridad relativa, pero es cómodo permitir la entrada de una luz natural que baste para orientarse y ver el espejo, el soporte, etcétera. No es posible ningún examen útil si el espejo no se halla en perfecto equilibrio térmico con el aire ambiente. La simple operación que consiste en tomar el espejo frío para colocarlo en el soporte necesita luego una espera de media hora ; si el espejo acaba de ser trabajado, al cabo de una media hora podrá analizarse su forma general gracias a un intercambio térmico superficial, pero el radio de curvatura y su forma exacta cambiarán todavía durante varias horas.

Para centrar rápidamente el aparato, se lo dispone aproximadamente frente al espejo a una distancia cualquiera pero un poco mayor que el radio de curvatura. Con la lámpara encendida y quitada la rendija, se busca moviendo la cabeza, la imagen de retorno del orificio de la linterna que debido a sus dimensiones (1 cm por ejemplo), es fácil de hallar ; esta imagen es más pequeña que el objeto. Se desplaza lo suficiente todo el conjunto formado por el aparato de **Foucault** y el trípode para aproximarse al espejo y llevar la imagen de retorno, que no se perderá de vista, a la proximidad del cuchillo. El diámetro de la imagen del orificio aumenta ; cuando se logra la misma dimensión que el objeto se está cerca del centro de curvatura ; puede colocarse la rendija e intentar un primer corte con el cuchillo. La imagen de la rendija debe ser exactamente paralela al filo del cuchillo, pudiéndose hacer un ajuste preciso por medio de un ocular Ramsden y un cuchillo giratorio (figura 31). Careciendo de un ocular que permita ver simultáneamente nítidos el cuchillo y la imagen, podemos contentarnos con separar el ojo aproximadamente 30 cm detrás del cuchillo y verificar que la imagen se extingue simultáneamente en toda su altura ; las franjas de difracción, de las que hablaremos en el párrafo siguiente, dan un criterio más sensible. Una vez hallada la intersección, ocurre a menudo que el cuchillo no está en el mismo plano frontal que la fuente. La diferencia puede alcanzar varios centímetros sin inconvenientes para el control, pero hay que tomarla en cuanta si se desea medir el radio de curvatura del espejo. En este caso nos serviremos de una regla larga y liviana que se apoya en el centro del vidrio, y trazaremos marcas con tiza a la altura de la fuente y del cuchillo ; el radio de curvatura es el promedio de las distancias de ambas marcas al centro del espejo.

El principiante practicará cuanto pueda para hallar las posiciones notables del cuchillo que muestren las zonas principales del espejo defectuoso que examina con un oscurecimiento uniforme, para apreciar si existe un defecto en profundidad o en elevación ; nunca olvidará hacer mentalmente el razonamiento acerca de la dirección de la iluminación ficticia.

Difracción en el ensayo de Foucault

El enorme interés que los ópticos astrónomos acuerdan al método de Foucault debe incitar a la búsqueda del límite de validez de la explicación puramente geométrica tomando en cuenta la naturaleza ondulatoria de los rayos luminosos. Es muy curioso que los fenómenos de difracción no tengan aquí sino un papel muy secundario (lo que generalmente no ocurre con las pruebas “mejoradas” que se han propuesto), al punto que los hubiéramos pasado completamente por alto en estas notas destinadas a los aficionados si no fuera necesario ponerlos en guardia contra probables errores de interpretación y señalar la posibilidad de su aprovechamiento. Rayleigh fue el primero en considerar el brillante anillo de difracción visible alrededor del espejo, aun cuando el cuchillo alcanza a cubrir totalmente la imagen ; este anillo entorpece la interpretación correcta de los defectos del extremo del borde. Banerji intentó aprovechar este fenómeno. Una teoría completa de la prueba de **Foucault** fue elaborada recientemente por Gascoine y por Linfoot, y la conclusión práctica de estos trabajos es que no hacen una corrección importante a la interpretación geométrica, en caso de que no haya grandes aberraciones del orden de una franja, que por otra parte resultan fáciles de estudiar con fuentes suficientemente grandes como para que la difracción no resulte molesta. Ya hemos visto la utilidad que F. Zernike supo extraer de su teoría ondulatoria de la prueba de **Foucault**, y su nuevo método se aplica especialmente a los pequeños defectos elementales más o menos periódicos causados por la estructura de la herramienta.

En 1931 A. Couder señaló el tipo de franjas oscuras de Fresnel que bordean la sombra del cuchillo cuando se encuentra en posición netamente extrafocal y subsisten aún en la intersección si el haz no es anastigmático. Este fenómeno sólo se observa con una rendija suficientemente fina y su interés práctico es bastante grande ; en primer lugar, permite ajustar el ancho de la rendija en un valor correcto y colocar el cuchillo exactamente paralelo a la imagen. Con los haces que nos interesan, abiertos de f/12 a f/16, se ven 2 ó 3 franjas de sombra (figura 34) bordeando la sombra geométrica para una posición extrafocal del cuchillo de 20 mm aproximadamente, cuando la rendija tiene el ancho recomendado de 30 a 50 μm. Con una fuente monocromática (por ejemplo de rayo láser) y una rendija de 3 μm se pueden observar y fotografiar las franjas sobre toda la mitad de la superficie no cubierta por la sombra.

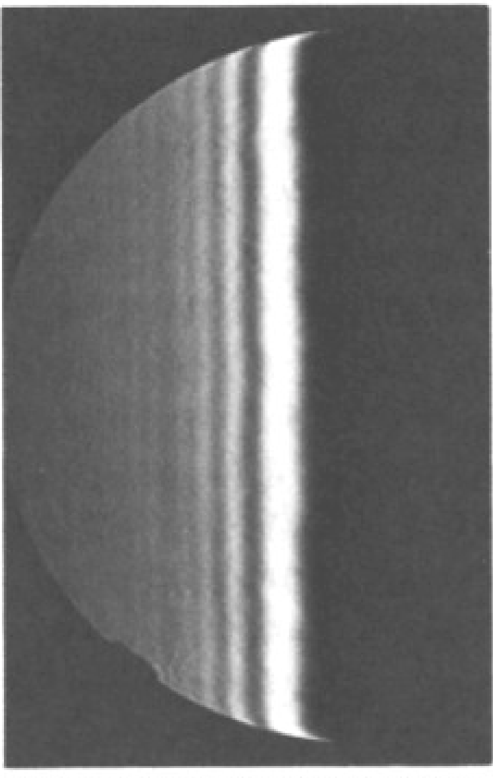


Fig 34. Franjas de sombra intrafocales de un espejo esférico con borde rebajado en 1/3 de onda (rendija de 5 μ)

A. Couder demostró también la posibilidad de aprovechar este fenómeno para la apreciación inmediata de los apartamientos de tautocronismo sin ningún cálculo. En efecto, cuando el haz es anastigmático, las franjas son rectilíneas si el cuchillo en posición intrafocal cubre más de la mitad del haz ; en caso contrario, su forma permite apreciar la magnitud de la desviación utilizándose para esto la primera franja, que es la más visible y cuya distancia a la sombra (aproximadamente ¾ de onda) sirve de escala.

Por vía de ejemplo presentamos la fotografía de las franjas obtenidas con un espejo con borde rebajado, defecto que no habría sido apreciado tan exactamente desde el centro de curvatura a causa del anillo de Rayleigh mencionado anteriormente.

Cuando se estudia una superficie con un defecto notable dentro de las condiciones del examen, por ejemplo un paraboloide bastante abierto, en el centro de curvatura, las franjas de sombra persisten más o menos nítidamente para todas las posiciones del cuchillo ; pero si uno se atiene a una fuente de 30 a 50 µm no será jamás molestado seriamente y la movilidad de las franjas impedirá confundirlas con los cambios de matiz de una ladera en el curso de un corte.

Límite de sensibilidad de la prueba de Foucault

Cuando se estudia una superficie cuyos defectos en las condiciones de examen, son muy débiles, los fenómenos de difracción no son molestos excepto en el borde extremo y la apreciación de los accidentes está limitada por el valor del más pequeño contraste perceptible. Si la fuente no mide más que 10μm de ancho, un error transversal de 0,5 μm de ancho se traduce en una variación muy visible de matiz. Esto corresponde sobre la onda en un espejo de 3 m de radio de curvatura, a una pendiente de $1/(6x10^6)$; por consiguiente, para hablar de la altura, es necesario fijar la dimensión transversal de la región aberrante. si se trata de un defecto de gran amplitud, por ejemplo de una zona de 60 mm de ancho de pendiente, la altura alcanzará $1/10^5$ mm equivalente a 1/60 de onda ; pero si el defecto es poco extenso, la altura del accidente será extraordinariamente pequeña. Hemos podido fotografiar accidentes de menos de 1 mm de ancho sobre el vidrio, cuya pendiente (deducida de consideraciones únicamente geométricas) era de $1x10^{-6}$ m, la altura correspondiente a 10 Å (o sea de 1/600 de onda) fue confirmada por una medida de los mismos accidentes mediante un método por contraste de fase (método de Lyot).

Principio de control de los espejos parabólicos

El control de los paraboloides en la misma disposición que tiene su uso regular, impone serias dificultades puesto que habría que alejar considerablemente la fuente de luz, o disponer de un plano patrón a autocolimación o de un colimador perfecto del mismo diámetro que el espejo ; pero a estas soluciones, aun los profesionales solo pueden recurrir en raras ocasiones. Se trabaja pues en el centro de curvatura ; Sabemos que, en estas condiciones únicamente un espejo esférico dará una imagen perfecta ; con el paraboloide aparece un defecto bien visible, inverso del presentado en el foco del esférico, que es un aspecto de la aberración esférica. Se puede prever anticipadamente la magnitud de este defecto, que se calculará por ejemplo, en el sentido longitudinal, cuya medida es más fácil ; bastará luego restar este valor de la aberración real, observada en el espejo estudiado, para obtener los residuos que representan los defectos propios del espejo y que un simple cálculo reducirá al plano focal, con el fin de poder apreciar directamente el grado de importancia que tendrá en relación con la figura de difracción perfecta.

Definiciones relativas a la aberración esférica

Como ejemplo, consideremos un espejo parabólico (figura 35) que da una imagen de un punto luminoso colocado en su centro de curvatura. Esta imagen no es exactamente un punto, puesto que las intersecciones de los rayos emergentes de zonas del espejo cada vez más alejadas de su centro, se realizan a distancias también cada vez más alejadas del espejo.

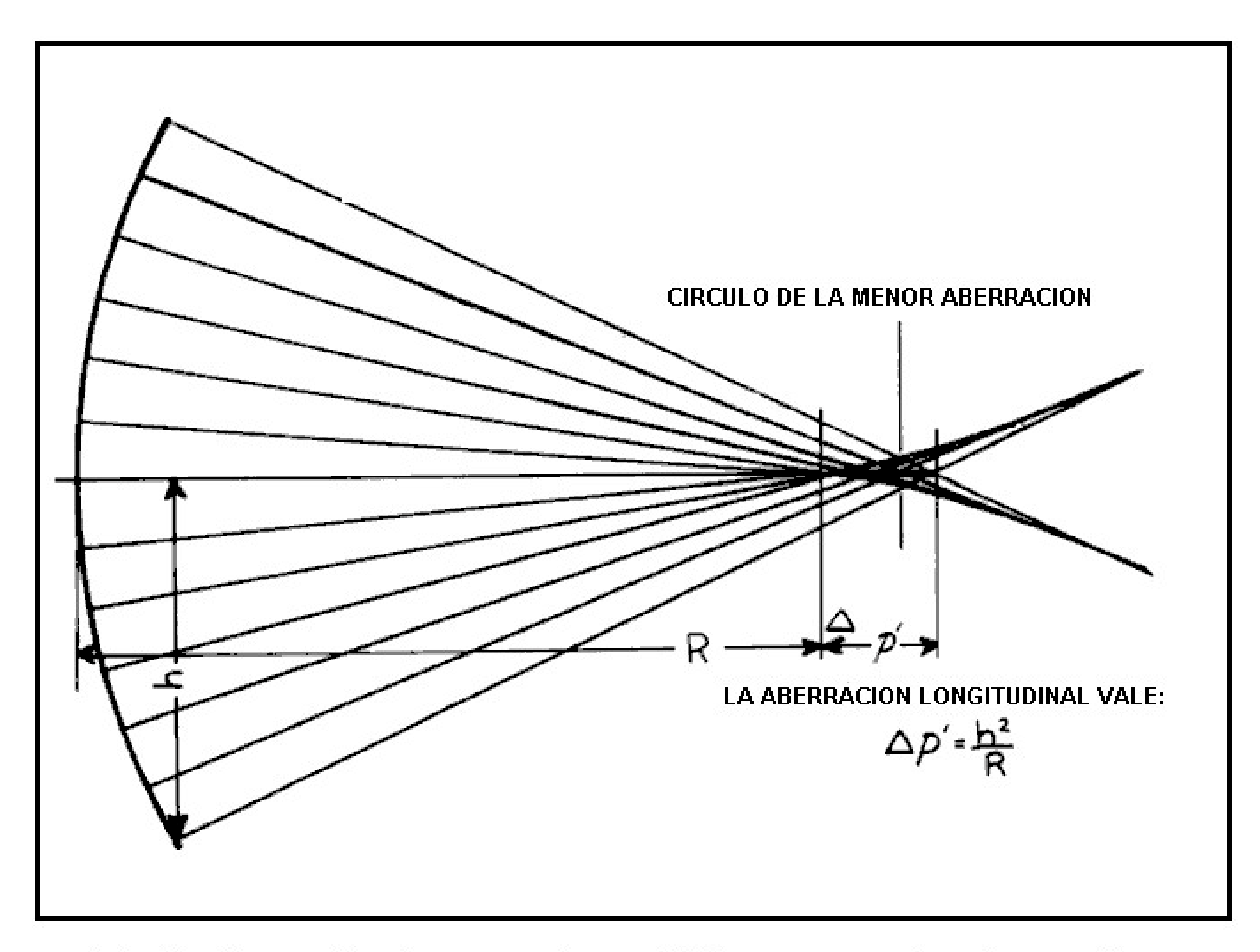


Fig 35. Aberración de un espejo parabólico en su centro de curvatura

La energía luminosa está repartida principalmente a lo largo de las intersecciones de los rayos vecinos que dibujan progresivamente una envoltura llamada “superficie cáustica”, de revolución alrededor del eje óptico, y cuya forma es parecida a un pabellón de trompeta ; su sección es visible en la figura 35, donde las alturas de incidencia están muy exageradas para mayor claridad. La superficie cáustica contiene además un pequeño segmento de recta luminosa confundida con el eje óptico, originada en cierto modo, si puede expresárselo así, por el apilamiento de las imágenes dadas sobre el eje por las zonas de radios crecientes.

Es particularmente interesante considerar este segmento ; su longitud Δp’[.1] mide la aberración longitudinal y se calcula por medio de un desarrollo en serie que, en la práctica, se reduce al primer término con una aproximación más que suficiente para los espejos comunes :

$$\Delta p' = \frac{h^2}{R}$$

La aberración longitudinal de una zona de radio h es igual al cuadrado de esa altura de incidencia dividido por el radio de curvatura R del espejo.

Pero el paraboloide no es sino un caso particular entre las superficies deformadas que uno encuentra (involuntariamente) cuando hace un espejo ; a menudo se introduce en la fórmula un coeficiente de deformación b, y la misma se transforma entonces, en la siguiente expresión general :

$$\Delta p' = b\frac{h^2}{R} + \ldots$$

b vale **-1** en el caso de la parábola y el signo menos indica solamente que la intersección de los rayos marginales ocurre más lejos del espejo que la de los rayos centrales. Si b es menor que -1, la superficie es hiperbólica; si está comprendido entre -1 y 0, su meridiana es una elipse vuelta sobre su eje mayor (prolate en inglés), y cuando está comprendido entre 0 y +1 la superficie es de revolución con referencia al eje menor de la elipse (oblate en inglés) (figura 36); en este último caso el radio de curvatura de los rayos marginales es más pequeño que el correspondiente a los rayos centrales y se dice entonces que la aberración es del tipo de subcorrección la trompeta tiene su extremo afilado vuelto hacia el exterior mientras que para todas las superficies con coeficiente de deformación negativo (figura 35) ella está dirigida hacia el espejo y existe entonces sobre corrección.

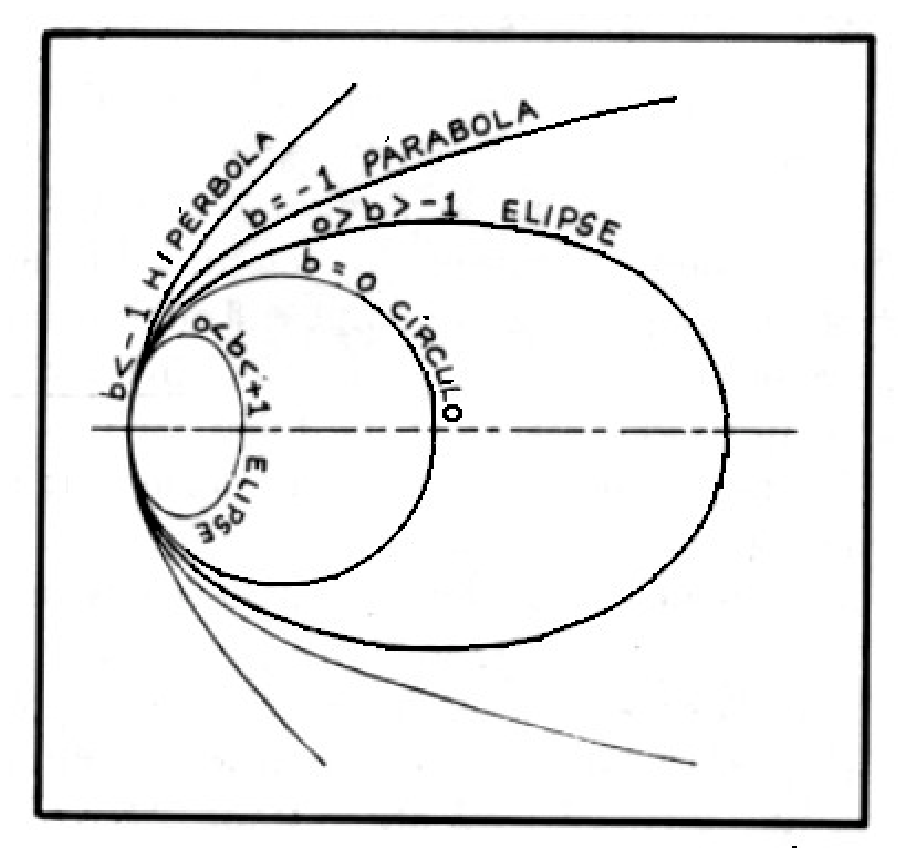


Fig 36. Significado del coeficiente de deformación b.

Notemos también que entre las secciones transversales de la cáustica, hay una cuyo diámetro es mínimo ; es el círculo de menor aberración (figura 35) que se halla a una distancia igual a ¾ del segmento de aberración longitudinal al contar de la intersección de los rayos centrales.

Descripción de la aberración esférica

Para el técnico óptico, la aberración esférica consiste, principalmente, en un desarrollo en serie de las potencias impares de h ; pero el observador y constructor, debe estar más familiarizado con los aspectos más concretos de la realidad física que, de hecho, es una resultante de la geometría y de la difracción. El observador tendrá a menudo obstáculos con la aberración esférica cuando observe el cielo; por ejemplo, si existe una sobre corrección común y observa una estrella bastante brillante con un ocular muy fuerte, ve las siguientes apariencias: en el foco de los rayos centrales Figura 37A, (en el cuadrado pequeño), la figura de difracción, casi normal en el centro, está rodeada de anillos anormalmente brillantes y numerosos, y a menudo los del borde se funden en una grande y pálida aureola si la imagen está agitada o la fuente no es puntual; alejando el ocular, la aureola disminuye de diámetro, y la energía se concentra sobre el anillo exterior (figura 37B) que continúa decreciendo hasta el momento en que se alcanza el círculo de menor aberración; en este plano la imagen es por otra parte muy mala, puesto que toda la luz está en la sección anular de la cáustica y el segmento axial no representa más que una débil fracción. Alejando todavía más el ocular, de modo de observar la intersección de los rayos marginales (figura 37C), veremos que gracias a ellos subsiste todavía un poco de luz sobre el eje, pero los anillos exteriores predominan y son bien marcados y corresponden a franjas de la cáustica. Por cierto que esta sucesión de aspectos se invertirá si la aberración es del tipo de subcorrección.

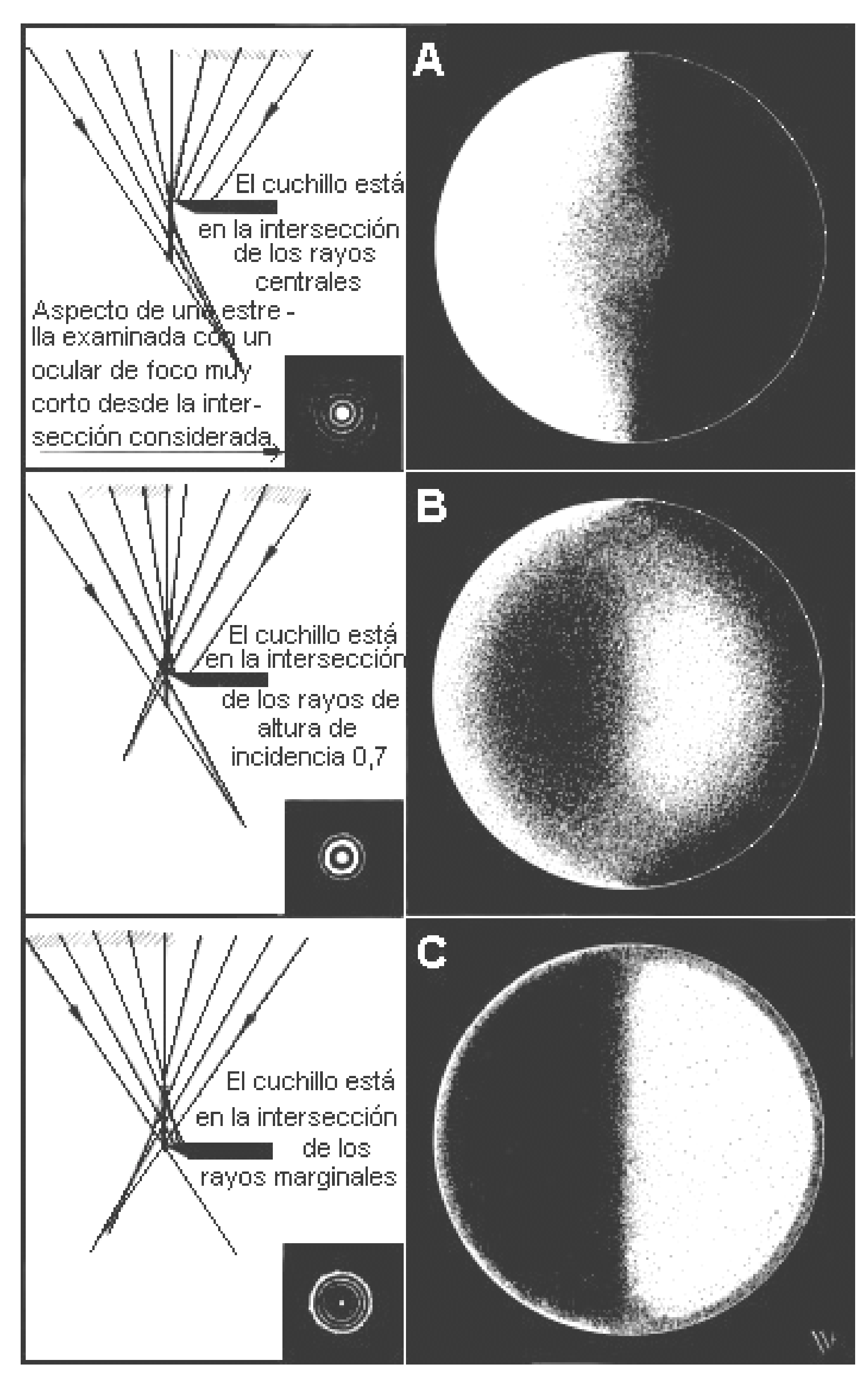


Fig 37. Sobrecorrección esférica

Veamos ahora lo más interesante para el constructor de espejos : el aspecto de las sombras por el método de **Foucault**. Nuestro cuchillo viene siempre de la derecha y corta primero el extremo de la cáustica ; el centro del espejo aparece en matiz uniforme (figura 37A), los rayos que vienen del lado derecho del espejo son interceptados por el cuchillo y las regiones correspondientes se ven oscurecidas. Por el contrario, el lado izquierdo está iluminado y el conjunto da la impresión de una gran prominencia ligeramente aplastada en el centro (no olvidemos que la luz viene del lado opuesto al cuchillo). Alejemos un poco el cuchillo ; cuando corte el segmento de aberración longitudinal por la mitad (figura 37B) se hallará en la intersección de los rayos enviados por la zona de radio:

$$\frac{\sqrt{2}}{2} = 0{,}707$$

(siendo 1 el radio del espejo) ; esta zona se ve entonces con un matiz uniforme y en relación con ella, las regiones de radios más cortos tienen entonces sus laderas vueltas hacia el interior, dando la impresión de una cavidad ; por el contrario, las zonas marginales tienen un radio más largo, y sus laderas inclinadas hacia el otro lado. El conjunto sugiere un anillo tórico en relieve, empalmado con suave pendiente. Este aspecto debe resultar familiar al óptico. Alejémonos todavía más ; la zona "neutra" llegará a alcanzar el borde mismo del espejo (figura 37C) ; todas las otras zonas tienen un radio de curvatura más corto y aparecerán como las paredes de una profunda cubeta.

Todas las superficies deformadas según una ley de esta naturaleza, presentan aspectos parecidos, más o menos notables, cualquiera que sea el valor negativo del coeficiente de deformación (elipses, parábola, hipérbolas) y aun cuando el signo es positivo, con la condición de dar vuelta a la figura conservando la convención de iluminación (el aspecto corriente es una prominencia con los bordes levantados). La sensibilidad del aparato de **Foucault** empleado, la abertura relativa del espejo, la magnitud de su radio de curvatura, son otros tantos factores que influyen igualmente sobre el contraste de las sombras. Para fijar ideas, digamos que los aspectos de la figura 37 se observan en un espejo parabólico estándar de 200 mm a f/D = 6 y con el aparato descrito anteriormente con una rendija normal de una treintena de micrones de ancho. Si el espejo tiene una abertura relativa más grande (o si es hiperbólico), las sombras son más marcadas, y el límite de las medias tintas entre los negros y los blancos se estrecha ; por el contrario, con un espejo de f/D = 10 (o un espejo normal elíptico) las sombras son muy débiles y el relieve muy atenuado. Es evidente que son indispensables. Es evidente que son indispensables las medidas cuantitativas para establecer la perfección del espejo y especialmente debemos poner a los aficionados en guardia contra los numerosos charlatanes que nada han comprendido respecto de las sombras y proponen métodos "simplificados" que carecen de valor.

Medida de la aberración esférica

También **León Foucault** fue el primero en describir los "sólidos diferenciales" dibujados en la figura 37, de los que nos servimos para medir la aberración longitudinal. Para ello se busca experimentalmente la posición longitudinal del cuchillo que da el aspecto A y se anota el desplazamiento a partir de un cero arbitrario de la reglilla (si el aparato no está dividido, se traza una marca sobre una tarjeta) ; del mismo modo se busca la posición más alejada del espejo donde se observe el aspecto C y la diferencia de ambas lecturas (o la distancia entre ambas marcas de la tarjeta) da la longitud del segmento $\Delta p'$. Bastará comparar este segmento con su valor teórico, para saber si el espejo está más o menos deformado que la parábola. Por ejemplo, con un espejo de 20 cm a $f/D = 8$ se tiene $h = 100$ y $R = 3200$; por consiguiente, $\Delta p' = 3{,}12$ mm. El espejo estándar tiene $\Delta p' = 4{,}17$ mm. Por otro lado se verifica que en la mitad de este segmento el cuchillo da el aspecto B, es decir que la zona neutra está sensiblemente a 0,7 del radio del espejo y que las zonas se empalman normalmente, si irregularidades. Este ensayo sumario puede, en rigor, bastar para verificar un espejo poco deformado (por ejemplo uno de 20 cm de $f/D = 8$) pero exige del operador una profunda experiencia de las sombras ; en efecto, el corte de los rayos centrales es poco preciso con rayos que se cortan tan oblicuamente y el de los rayos del borde extremo es molestado por el brillante anillo de Rayleigh. Por otra parte, anomalías zonales que son muy frecuentes, ya sea en el centro o sobre el borde, bastan para inducir a un juicio erróneo sobre un espejo, si el simple examen de las sombras no ha permitido descubrirlas.

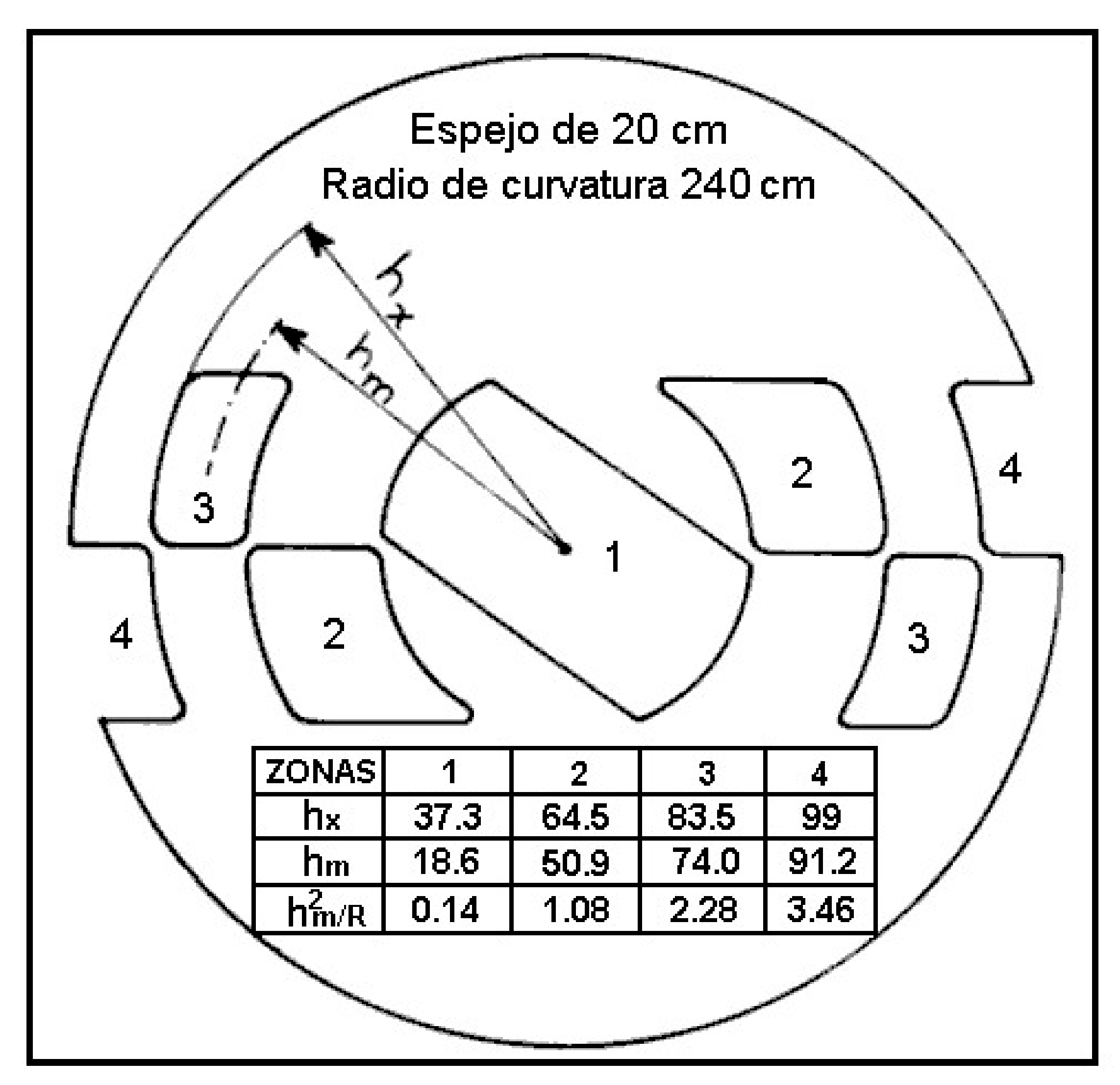
G. W. Ritchey tuvo la idea de hacer una comparación fotométrica mediante dos ventanas recortadas en un diafragma, las cuales descubren dos porciones de una misma zona simétrica con respecto al eje. Las ventanas del diafragma de Ritchey eran tan estrechas que las orlas de difracción estorbaban considerablemente las medidas. A. Couder ha descrito un diafragma mucho más práctico, del cual vamos a ocuparnos.

Diafragma de zonas concéntricas de A. Couder

Las ventanas descubren zonas sucesivas cuyos radios tienen sus cuadrados crecientes en progresión aritmética[4] ; por lo tanto son más estrechas hacia el borde del espejo, donde la más rápida deformación no permite examinar en matiz uniforme una zona ancha. El diafragma se recorta en papel grueso de dibujo, cartulina o cartón delgado ; su trazado es fácil ; una primera circunferencia exterior corresponde al diámetro del vidrio y una segunda, ligeramente más pequeña, es el diámetro a la altura del bisel ; su radio es el radio exterior de la zona marginal cuyo ancho se determina por consideraciones prácticas dictadas por una parte por la dificultad de efectuar buenas medidas si la zona es muy angosta y por la otra, por la obligación de observar un matiz casi uniforme si la zona es muy ancha. Si el espejo está muy deformado, son necesarias numerosas zonas (por ejemplo, una por cada milímetro (de eje focal) de aberración), pero con un espejo estándar aconsejamos especialmente a los principiantes no descender por debajo de una quincena de milímetros para una ventana vista a 3 m (valen más 4 buenas lecturas que 10 malas).

Una vez determinadas las ventanas exteriores, la ley de los cuadrados de los radios decrecientes en progresión aritmética (cuya razón se deduce del ancho de la zona externa), que puede ser respetada sólo aproximadamente, permitirá elegir el número de ventanas y sus radios exteriores[5].

Aclaremos por medio de un ejemplo : la figura 38 da las características del diafragma estándar empleado en la Commission para el control de los espejos de 20 cm.



ZONAS	1	2	3	4
h_x	37.3	64.5	83.5	99
h_m	18.6	50.9	74.0	91.2
h_m^2/R	0.14	1.08	2.28	3.46

Fig 38. Diafragma de Couder

Una vez recortado el diafragma, se miden los diámetros interiores y exteriores reales de cada zona (a 1/10 de mm). Se calcula la altura media[6] h_m para cada una (dividiendo por 4 la suma de los dos diámetros) y la aberración longitudinal h_m^2/R se comparará con los números hallados experimentalmente.

Procedimiento y causas de errores en las medidas visuales con el diafragma

Deberán ser especialmente cuidadas las precauciones habituales para la homogeneidad térmica en el vidrio y en el aire de la habitación ; el espejo estará correctamente colocado en su soporte de contactos geométricos, desde varias horas antes.

El Aparato de **Foucault** estará provisto de su abertura, cerrada entre 10 y 20 μm, paralela a la arista del cuchillo (se ven 4 ó 5 franjas de sombras a 20 mm de la intersección). La corredera del carrito porta cuchillo estará dispuesta paralela al eje óptico (la penetración del cuchillo en el haz no se modifica cuando se desplaza el carrito longitudinalmente y el cuchillo es perpendicular a este eje). Primero se verifica, con el espejo descubierto, la uniformidad de la iluminación (rotación de la linterna sobre sí misma) y la sucesión de los aspectos de la figura 37 que naturalmente deben producirse para enfoques del cuchillo comprendidos dentro de la graduación. Se puede asegurar el barrilete que inmoviliza el aparato de **Foucault** y colocar el diafragma de zonas concéntricas delante del espejo, orientando horizontalmente el eje de las zonas y cuidando el centrado con referencia al bisel del vidrio ; un pequeño resorte de alambre de acero puede eventualmente, asegurar la posición (evitar tocar el espejo). Es necesaria una verificación más cuidadosa de la uniformidad de la iluminación de las ventanas exteriores sobre todo (cuchillo netamente fuera del haz). Para las comparaciones fotométricas, el ojo trabaja en las mejores condiciones si la habitación no está completamente a oscuras y hasta es ventajoso iluminar la pantalla y el aparato con una luz difusa muy uniforme. Todas estas precauciones no deben acobardar a los principiantes ; ¡que ensayen ! Al cabo de un pequeño número de experiencias comprenderán mejor estas precauciones y sabrán poner rápidamente en posición correcta su dispositivo de control.

No falta sino hacer las medidas ; comencemos, por ejemplo, por la zona central. Si esta zona parece más negra del lado izquierdo es necesario aproximar el cuchillo al espejo (se acciona el tornillo de los desplazamientos longitudinales con la mano izquierda mientras que la derecha maniobra al mismo tiempo el tornillo de corte para ensayar los distintos enfoques) ; inversamente, se lo alejará si el lado derecho es el más oscuro.

Cuando se alcanza el centro de curvatura de la zona, ésta se oscurece uniformemente en toda su superficie. La posición del cuchillo es dada por la escala graduada con referencia a un origen arbitrario (únicamente nos interesan las diferencias) y se puede pasar a la zona # 2 cuyas ventanas son fáciles de identificar con la disposición del diafragma de Couder ; naturalmente, la ventana de la derecha es la más oscura, lo que equivale a decir que es necesario alejar un poco el cuchillo para hallar el centro de curvatura de la zona y así se continúa para todos los pares de ventanas que dan los enfoques longitudinales correspondientes. Alcanzada la última ventana, es conveniente recomenzar inmediatamente otra serie de medidas retrocediendo hasta el centro del espejo. Para comparar la iluminación de dos ventanas bastante alejadas una de la otra, es necesario proceder como en la comparación de dos estrellas separadas en el cielo, fijando alternativamente la atención sobre una y otra sin tratar de fusionarlas. Esta fotometría es

más fácil y menos expuesta a errores, que se deben principalmente a la difusión lateral por difracción, si se examinan las ventanas al comienzo de la extinción, sin continuar la comparación más allá de la mitad del corte.

La figura 39 da una idea de las causas de errores, de las que hablaremos a continuación. Debemos insistir, sin embargo, en que este método, a pesar de sus defectos, es el más útil.

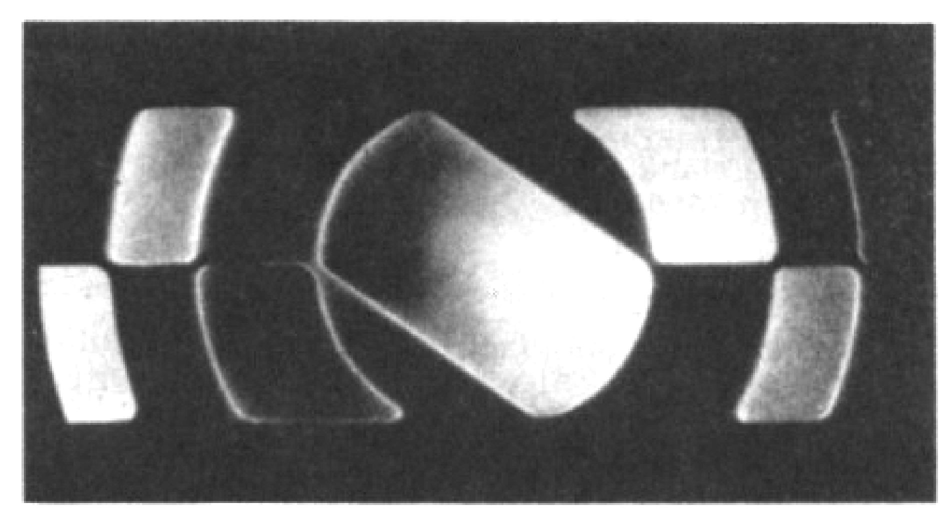


Fig 39. Prueba de Foucault de un espejo estándar; El cuchillo está en la intersección de los rayos de la zona 3. Observe las orlas de difracción y la fusión parásita (rendija de 20 μ)

Cuando la superficie del espejo es muy suave, el aire de la habitación calmo y la iluminación conveniente, el operador ejercitado por algunas decenas de miles de medidas, encuentra el centro de curvatura de una zona intermedia de un haz a f/12, con un error medio de 2/100 de milímetro. Evidentemente el principiante no debe esperar tal precisión ; sus primeras series podrán diferir de 3 ó 4/10 entre ellas, pero un poco de perseverancia dará enseguida diferencias de 1 a 2/10 como máximo y se tendrá una aproximación suficiente haciendo entonces la media de 4 medidas sobre cada zona, que dará con seguridad valores a 1/10 aproximadamente, permitiendo conocer la forma del espejo con una precisión mejor que el décimo de la tolerancia de Rayleigh para los espejos que nos ocupan. Volveremos sobre esta reducción de medidas, en oportunidad de establecer el boletín de control.

Defectos que no son de revolución

Si bien son graves, no diremos más que algunas palabras puesto que quien trabaje convenientemente un espejo sobre una mesa fija, no tendrá en la práctica ocasión de notarlos.

Para descubrir este género de anomalías, el método de las sombras de **Foucault** no es recomendable para quienes están poco familiarizados con los aspectos de difícil interpretación que las sombras pueden presentar para ciertas orientaciones del cuchillo. Un ensayo con el ocular sobre las manchas ligeramente extrafocales, puede bastar para tranquilizarnos. Ya hemos explicado que no es fácil de obtener una estrella artificial suficientemente pequeña y bien redonda, por medio de un agujero y con el montaje anteriormente descrito. Lo mejor es emplear la linterna portarrendija (con la rendija provisionalmente reemplazada por un agujero redondo de 3 ó 4 mm) para iluminar una bolita de acero o balín de aproximadamente 6 mm de diámetro pegada con un poco de resina en un lado del ocular de observación (figura 40). Si la bolita es nueva y bien pulida (se la mejora mucho por medio de una torta montada sobre un torno, con brea y rojo) da una imagen “estelar” del filamento de la lámpara que es recogida por el espejo, el cual a su vez devuelve una imagen, que se observa con un ocular bastante fuerte ($f \leq 10$ mm, por ejemplo, para haces a f/12). Cuando el espejo es prácticamente esférico se pueden utilizar manchas poco extrafocales : 2 a 3 mm solamente, que permanecen bien redondas si el espejo es exactamente de revolución, pero cuya ovalización es ya visible para un astigmatismo de 1/10 de onda. Con un astigmatismo más notable, se encuentran posiciones longitudinales del ocular, distantes varios milímetros, que corresponden a elipses cuyos ejes son ortogonales (figura 40). Cuando además existe aberración esférica, se deben tomar manchas un poco más extrafocales, pero el ensayo mantiene generalmente un carácter crítico suficiente. Por excepción, en el caso de tensiones o compresiones extraordinarias (discos pegados sobre una “moleta” o un vidrio de “refuerzo” ; o temple muy fuerte) se pueden observar asombrosas y desastrosas figuras irregulares, del tipo indicado a la derecha de la figura 40, que son frecuentes en objetivos proporcionados por la industria. Antes de decidir que los defectos corresponden al espejo, conviene por un lado, hacer girar la bolita sobre ella misma o iluminarla desde una dirección un poco diferente para eliminar eventualmente sus propios defectos, y por otra parte debe tenerse en cuenta el astigmatismo del montaje, no siempre desdeñable cuando la bolita está a determinada distancia del eje o iluminada muy oblicuamente. Lo mejor es hacer girar el espejo sobre sí mismo y ver si el ángulo de posición del eje de una elipse extrafocal gira al mismo tiempo. Esta operación debe hacerse con cuidado para no calentar con las manos un diámetro determinado del espejo ; para evitar luego un laborioso enfriamiento, no se toca el vidrio sino con la interposición de franela o guantes gruesos.



Fig 40. Estudio de los defectos no de revolución

No trataremos el retoque de defectos que no son de revolución ; éstos no se encuentran sino en caso de falsas maniobras sistemáticas que resultan imperdonables, tal como el olvido de girar el vidrio de abajo, pegar una manija muy grande o un disco de “refuerzo”, o también si el disco posee una heterogeneidad verdaderamente excepcional. En todos los casos, el mejor medio, aún para un óptico ejercitado, es buscar la eliminación automática del defecto continuando simplemente el trabajo normal por lo menos durante una hora, favoreciendo la eliminación de los errores sistemáticos con la inversión de los discos, el cambio de carreras, o mejor aún de operador. Solamente después de muchas tentativas de este tipo hay que resignarse a tallar otro espejo ; nosotros jamás encontramos semejante caso en la *Commission des Instruments.*

Las ondulaciones

Se trata de un sistema de accidentes, no de revolución, que afectan en la forma de pequeñas ondulaciones que generalmente no tienen más de 2 ó 3 centésimas de longitud de onda de altura, pero que, visto su número y disposición casi periódica, pueden hacer actuar al espejo como una red de fase y causar una difusión de luz no siempre despreciable. Pueden distinguirse las ondulaciones primarias cuyo período es el de la malla de la herramienta, bien visible con un aparato de **Foucault** de fuente intensa y rendija fina, capaz de aumentar el brillo de los anillos de difracción a partir del número 2 ó 3 y las microondulaciones, que se descubren en rigor fotográficamente con un aparato de **Foucault** bien ajustado, pero sobre todo por el método de Lyot. Estas microondulaciones dependen principalmente de la naturaleza de la torta, del agente de pulimento y quizá también del estado estructural del vidrio ; es capaz de difractar la luz mucho más allá de la imagen central, a varios minutos de arco, superponiendo así una luz parásita en todo el campo.

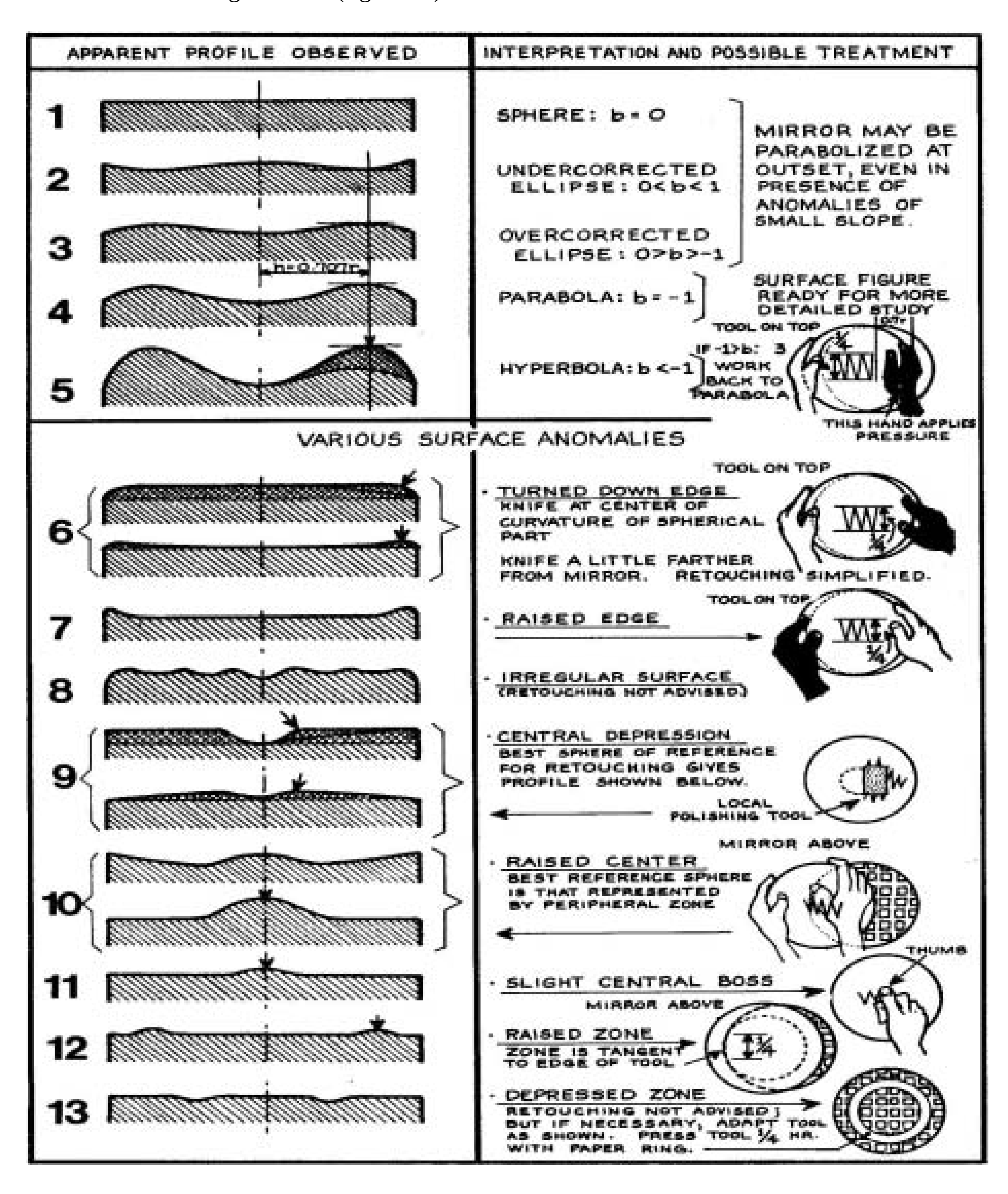
Con una torta de cuadrados de 20 mm se provocan sobre el vidrio almohadillas de fondo plano separadas por tabiques de radio más corto que reproducen exactamente los canales de la herramienta. Una torta H. C. F. con alvéolos hexagonales de cerca de 6 mm produce ondulaciones primarias como panal de abejas del cual dimos una fotografía en la figura 29A tomada en el aparato de **Foucault** y microondulaciones muy pronunciadas (figura 29D). La identidad entre la estructura de la herramienta y la de las ondulaciones engendradas es perfecta, aún para los más pequeños accidentes que se puedan fotografiar en contraste de fase. Un ejemplo típico lo proporcionan las tortas para retoques parciales guarnecidas de tafetán de seda, cuya trama se encuentra exactamente impresa sobre el vidrio en forma de surcos de menos de 1 Å de profundidad y de 2/10 mm de ancho, aún después de la más pequeña intervención realizada con carreras constantemente cruzadas si marcar el más mínimo tiempo de detención en un lugar. Agregamos que en éste último ejemplo, la luz difractada producida no es perjudicial sino en el caso de un lente para coronógrafo.

Podrían desfasarse eficazmente las ondulaciones primarias alternando el pulido con dos herramientas con cuadrados de diferentes dimensiones. Pero corrientemente uno evita tal complicación. Una primera precaución elemental es evitar el régimen de pulido brutal "a los gritos" que siempre provoca un calentamiento irregular y adherencias locales anormales de la herramienta. A. Couder[7] señaló que durante el trabajo a máquina de grandes piezas es conveniente impedir los giros espontáneos de la herramienta que se producen sobre los cuadrados anormales provocando anomalías periódicas, mecánicamente mantenidas, que amenazan alcanzar una amplitud catastrófica. Cuando se trabaja a mano el peligro es menor, pero es necesario, de todos modos, gobernar los giros de la herramienta causados por falta de adherencia y no introducir más que las rotaciones necesarias, hechas voluntariamente durante el movimiento de vaivén y no al cabo de la carrera. Hemos podido combatir muy eficazmente las ondulaciones primarias en la *Commission des Instruments* haciendo trabajar 4 ó 5 personas sobre el mismo espejo por permutación circular cada 10 minutos en las cuatro mesas de nuestro taller. El operador aislado obtendrá buenos resultados obligándose a reaccionar de modos diferentes, por ejemplo alternando las carreras normales en forma de W y de doble rizo (∞). En cuanto a las microondulaciones,

se trata de una pura cuestión técnica. Recomendando el trabajo con brea y rojo damos el mejor procedimiento posible para obtener superficies niveladas a menos de 1 Å. ¡Confiamos en que el lector no escuchará a aquellos que le hablarán de tortas de cera o de papel ! No es raro que los profanos produzcan superficies pulidas por un régimen tan poco eficaz que las ondulaciones primarias sean nulas ; desgraciadamente, al mismo tiempo la forma general del vidrio es absolutamente indeterminada, por lo común fuertemente zonada y achatada. No perdamos de vista a los más graves por considerar los minúsculos defectos que no interesan sino a los amantes del arte.

Los defectos zonales

Son evidentemente los más importantes y los más frecuentes. Debemos pasar revista a los más comúnmente engendrados (figura 41).



La esfera (figura 41-1) no es más que el caso particular del apartamiento nulo que es capaz de producir un sistema de trabajo no perturbado[8]. También es frecuente hallar una superficie deformada, sea hacia la bajo corrección esférica (figura 41-2) o hacia la sobre corrección (figuras 41-3, 4 y 5). Una rápida medida sin diafragma de la aberración longitudinal fijará inmediatamente la actitud a tomar para mejorar el espejo. Si la deformación es de sentido contrario o menor que la parábola, se podrá parabolizar de primera intención como si se tuviera una esfera. Éste es el caso más favorable y podrá aplicárselo aún en presencia de una anomalía de pendiente bastante suave. En el caso de una hipérbola que no exceda 2 ó 3 veces la parábola, se podrá volver directamente a la parábola, por ejemplo con un régimen de sobrepresiones en la zona 0,7 que entra en la categoría de las intervenciones descritas más abajo.

Pero también muy a menudo subsiste al final del pulido un defecto zonal anormal debido a una herramienta defectuosa o a un hábito vicioso del operador. Como no es posible confiar en algunos minutos de parabolizado para eliminarlo, es necesario hacerlo desaparecer o al menos suavizarlo suficientemente. Antes de intentar un retoque propiamente dicho, es necesario ensayar la eliminación automática prosiguiendo el trabajo normal durante una buena hora después de una cuidadosa verificación de la herramienta y de las carreras. Una anomalía del borde (figuras 41-6, 7) es frecuentemente debida a una presión incorrecta de las manos en el borde de la herramienta, a carreras demasiado largas o a la brea muy blanda. Una superficie irregularmente zonada es inadmisible (figura 41-8) ; es necesario proseguir el trabajo bastante tiempo, con una torta bien amoldada. Otras irregularidades zonales (figuras 41-9, 10, 11, 12 y 13) pueden provenir de una visible deformación de la herramienta, tal como cuadrados con aristas rotas, faltantes o mal cortados. Es preciso, ante todo arreglar la torta y continuar prolongadamente el trabajo normal. Por lo general, una anomalía difícil de retocar (zona deprimida, hoyo central) podrá eliminarse o al menos reemplazarse por un defecto más fácil de corregir (por ejemplo una protuberancia central).

Los retoques parciales

Conviene llevar un cuaderno de retoques que indique para cada intervención, una o más secciones aparentes notables del sólido diferencial observado por el método de **Foucault** (la figura 41 brinda ejemplos de perfiles a elegir), la indicación del tiempo de trabajo, de las carreras, de las presiones elegidas sobre la herramienta etcétera. Tal registro debería constituir, para un operador dado, el mejor documento de referencia para el trabajo futuro ; desgraciadamente no es posible aplicar un estricto determinismo a un problema de retoques parciales. No se trata de poner en duda el sagrado principio de causalidad, sino que es menester confesar que el conjunto de causas que determinan la acción de la herramienta no es jamás perfectamente conocido y reproducible. Con una herramienta grande solo se sabe lo que se hace cuando se trabaja durante unos pocos minutos y sin ninguna perturbación y con una torta para retoques es muy difícil empalmar el desgaste producido con el resto de la superficie. Del mismo modo, existen algunos principios que son de aplicación bastante general y segura en la medida en que se sepa evitar su superposición con otras causas de perturbación. Tales principios son :

1. El desgaste es una función creciente de la presión. Para nosotros es el principio más importante y más seguro. Los métodos de parabolización como veremos, constituyen a menudo sus corolarios. Un operador práctico puede de esta manera intentar cualquier retoque con una herramienta grande, lo que es una ventaja importante con relación al uso de tortas para retoques. La sobrepresión puede producirse en la posición espejo arriba, colocando el vidrio en posición excéntrica de modo de hacer las carreras con la zona a deprimir tangente al borde de la herramienta (figuras 41-10 y 12) o mejor todavía en la posición espejo abajo apoyándose en uno de los bordes de la herramienta (en la figura 41 las manos que ejercen esta presión aparecen sombreadas). El borde de la herramienta constituye ciertamente, un lugar crítico, donde puede localizarse con facilidad un desgaste anormal ; por ejemplo, con las mismas carreras pueden corregirse a voluntad : un borde rebajado (figura 41-6) o levantado (figura 41-7) simplemente apoyándose sobre el borde interior o exterior de la herramienta colocada en la conveniente posición excéntrica[9]. Un peso móvil, desplazado con la mano sobre el dorso de la herramienta, permite lograr sin fatiga una presión regular, pero la maniobra no es cómoda. Hay que tener presente la necesidad de variar siempre la amplitud de la carrera para evitar un gran desgaste estrechamente localizado.

2. El desgaste es función del tiempo de acción de la torta. Proposición evidente, pero cuya aplicación da lugar a sorpresas puesto que la función no es simple ni aun reproducible y en todo caso no tiene ninguna posibilidad de ser lineal mientras no se logre un equilibrio térmico permanente, lo que no puede ocurrir en el corto tiempo que dura un retoque. Con una herramienta de acción modificada, excepto en el caso de un gran defecto (hipérbola profunda) o mal situado (borde rebajado), una duración de trabajo de 5 ó 10 minutos generalmente es suficiente. Cuando el defecto es estrecho y la perturbación es grande (pitón central corregido con el espejo arriba en posición muy excéntrica) un sólo minuto puede producir un hoyo muy fastidioso para retocar. Ante la duda, es prudente adoptar tiempos de acción notablemente cortos. Siempre existirá la posibilidad de repetir el retoque, si el defecto subsiste.

3. El desgaste es función de la velocidad del movimiento relativo con referencia a la herramienta. Este principio tiene algunas aplicaciones para las pequeñas piezas trabajadas con una máquina de altas revoluciones, pero para nosotros su interés en menor. Solamente es preciso recordar que para la regularidad del trabajo y la suavidad de la forma, son desfavorables las carreras rápidas o a tirones.

4. Anormalidades del desgaste por una herramienta modificada. Si voluntariamente se pone fuera de acción una porción de la herramienta, sea por prensado con interposición de papel sobre la zona, por raspado ligero de la superficie de algunos cuadrados o aun por su retiro total, se perturba el desgaste sobre la correspondiente zona del vidrio. Esta manera de trabajar es a menudo aplicada a las tortas llenas utilizadas para los pequeños objetivos, pero da resultados muy inciertos con un espejo un poco grande. Es muy difícil gobernar la perturbación producida y suspenderla instantáneamente cuando el defecto está bastante suavizado ; por lo tanto, la integridad de un buena torta no debe sacrificarse a la ligera. No obstante, para tratar un borde rebajado con el recorte de las esquinas de los cuadrados marginales (G. W. Ritchey) está reconocido como eficaz y las herramientas con cuadrados en forma de huso (Ellison), son útiles para parabolizar.

5. Desgaste por medio de tortas de retoque. Este procedimiento aplicado desde 1857 por **León Foucault** es evidentemente, el más seguro para el espíritu determinista. Por lo tanto será útil advertir a los principiantes dispuestos a atribuirle a priori todas las virtudes[10]. La torta de retoque generalmente está construida por una herramienta de madera de un veintena de milímetros de espesor, cuadrada, rectangular o circular según el caso a tratar, con un ancho de 10 a 100 mm. Está provista de cuadrados de brea como una herramienta grande, pero para evitar las rayas es necesario encerar los cuadrados o mejor interponer un tafetán de seda (A. Couder), fijado al dorso con chinches y sin ningún doblez del lado útil, que permite también una acción más enérgica y más segura aunque con aumento de la luz difractada por las microondulaciones.

Para obtener buenos resultados es preciso no atacar con una torta de retoque un defecto grande ; este debe ser menor que ¼ de onda, estimado por la curvatura de las franjas de sombra. Unas marcas de tinta hechas en el momento del control indicarán el punto más alto de la zona, al borde de la sombra (no hay que cavar una zanja al lado de una colina). Debe ponerse el rojo en capa más espesa que para el trabajo normal. Cuando el efecto es poco extenso (figura 41-11) el dedo pulgar, o aun el índice (borde rebajado fino) pueden constituir, bien embadurnados de rojo, buenos pulidores de retoque. La presión a ejercer puede ser bastante grande, fácilmente del orden de 500 gr sobre una torta de una decena de centímetros cuadrados y las carreras, si bien estadísticamente distribuidas sobre el punto sobresaliente, suficientemente variadas y amplias para obtener un empalme suave. El tiempo de trabajo será contado en vueltas completas realizadas en torno del vidrio con la torta de retoque manejada con pequeñas carreras rápidas. Una sola vuelta de un minuto puede bastar en el caso de un débil defecto zonal ; éste es el caso más apropiado para la aplicación de esta técnica maravillosa que es necesario emplear del modo más moderado posible.

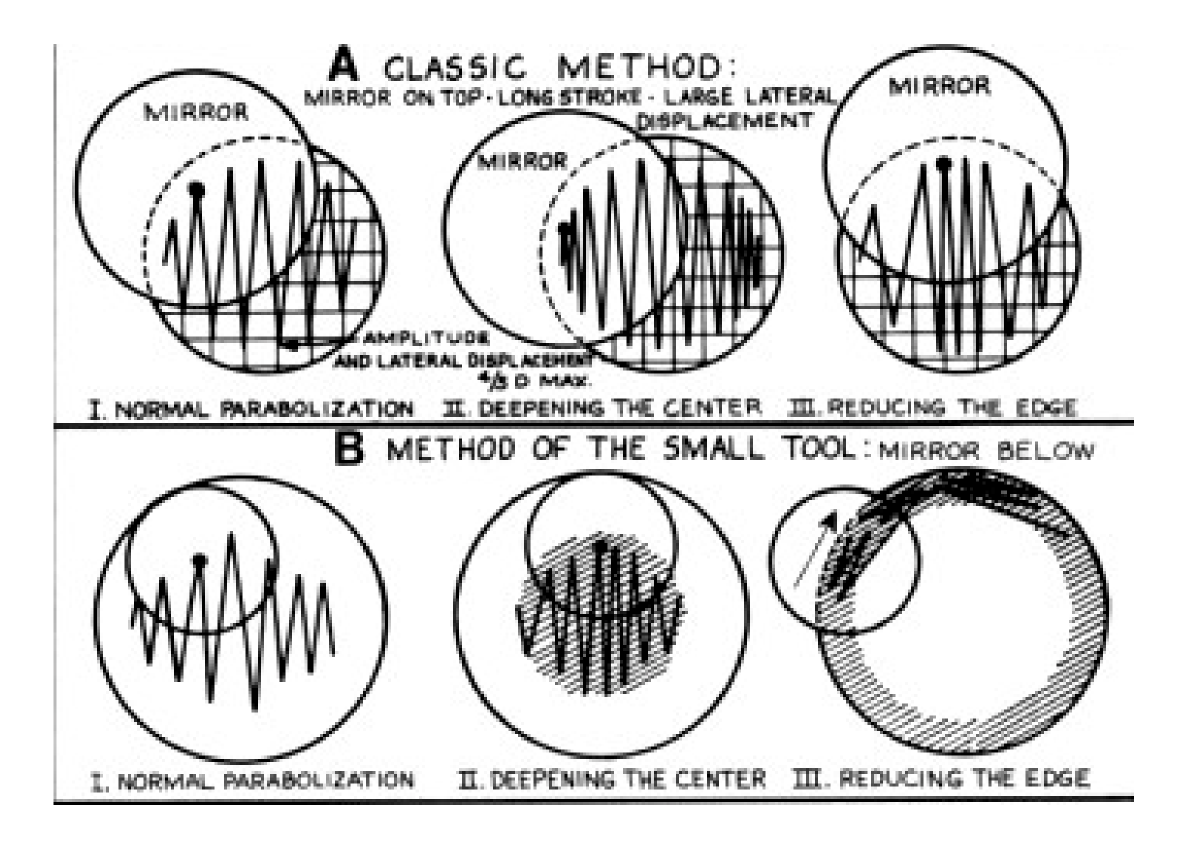
La destreza en este procedimiento no puede aprenderse sino por la experiencia ; un volumen de explicaciones no haría aquí sino embrollar a los temerosos. Es preferible no

aconsejar el método a aquellos que no se sientan bastante seguros de sí mismos. Efectivamente, en el caso de un gran defecto de pendiente suave, un trabajo torpe puede trasformarlo en un relieve mucho más accidentado y perjudicial. Dada la pequeñez de los defectos retocables en buenas condiciones con tortas de retoques, el método no podría interesar sino al meticuloso que desea exceder largamente la aproximación del vigésimo de onda y está dispuesto a correr un riesgo.

La Parabolización

Esta famosa parabolización no es más que un caso particularmente simple de régimen alterado, que no ofrece ninguna dificultad en el caso de un pequeño espejo no muy abierto.

A) Método clásico (figura 42A). Basta trabajar con el espejo arriba con carreras de amplitudes más grandes pudiendo alcanzar 4/5 D. Es recomendable recortar los ángulos de los cuadrados marginales, pero es menester no confiar demasiado en ello para evitar el borde rebajado, cuando la brea es blanda. Si la abertura del espejo alcanza a f/D = 6 podrá disminuirse progresivamente hacia el borde la superficie de los cuadrados cuyas filas tendrán la forma de husos (Ellison). La herramienta deberá ser cuidadosamente prensada sobre el espejo, no muy frío, pues desgraciadamente no es posible contar con la igualdad térmica de un trabajo prolongado. Una primera intervención sobre un espejo de 20 cm a f/D = 8 podrá durar de 8 a 10 minutos ; esta duración del trabajo convendrá también para un espejo a f/D = 6 puesto que es preferible no intentar parabolizarlo de una sola vez. Debe ponerse una capa de rojo y agua más espesa que para un trabajo normal y evitar las mojadas irregulares. Cuando puede conseguirse un buen operador promedio, será posible obtener de primera intención parábolas no muy deformadas con una alta precisión ; en este caso las carreras no deben ser muy alargadas ; 2/3 D como máximo, pero el trabajo debe durar aproximadamente una hora con cambio de operador cada 10 minutos ; de esta manera hemos podido parabolizar espejos automáticamente en el taller de la *Commission* gracias a 4 ó 5 operadores que se relevaban haciendo las “mismas” carreras.



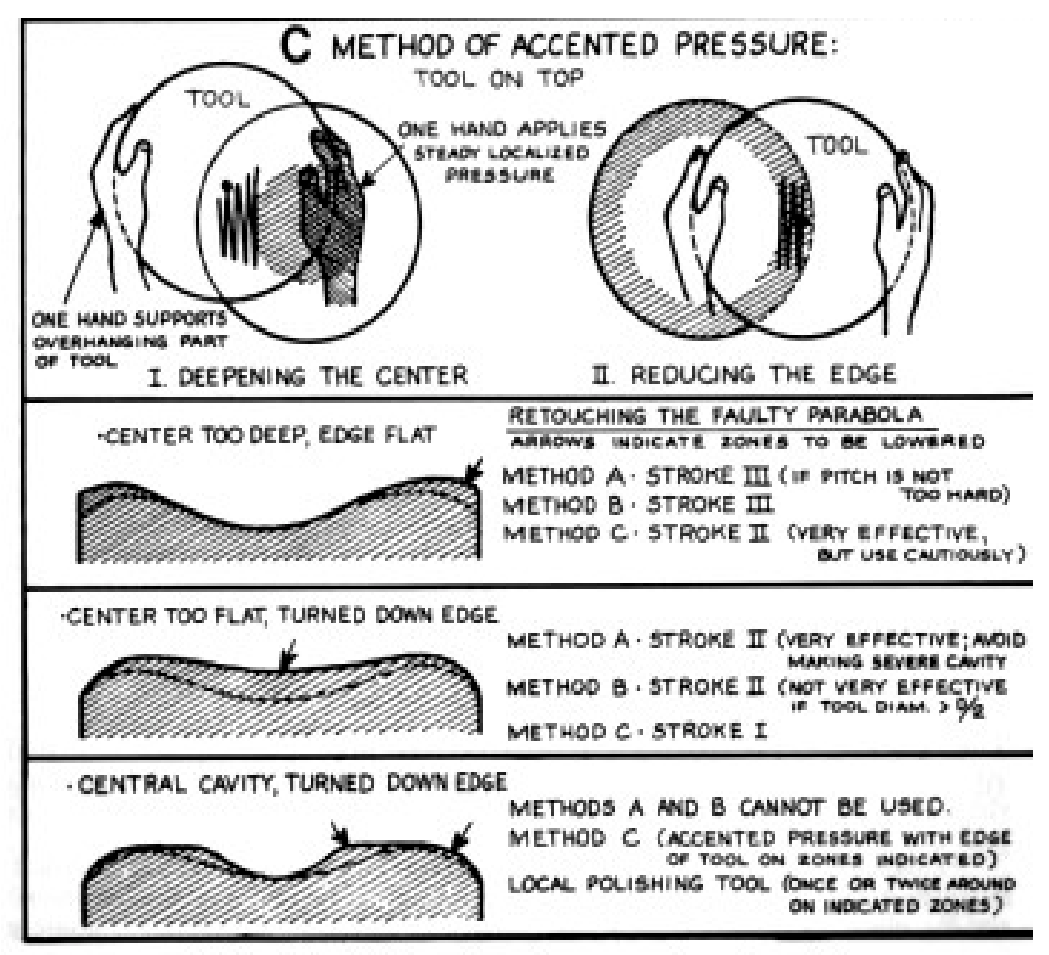


Fig 42. Métodos de parabolización

B) Método de la herramienta pequeña (figura 42B). Con un espejo un poco grande y no muy abierto, puede dar buenos resultados el empleo de una torta de la mitad del diámetro del espejo. El método es especialmente interesante para perfeccionar una forma obtenida con una herramienta grande ; si la duración del trabajo de la herramienta pequeña debe prolongarse mucho, existirá el peligro de que se produzcan ondulaciones y rayas.

C) Método de sobrepresiones (figura 42C). Hemos empleado este procedimiento tallando un espejo de 26 cm a f/D = 4 para el cual el primer método no permitía exceder con seguridad una elipse la mitad menos deformada que la parábola : se excava la parte central con sobrepresiones sobre el borde interior de la herramienta, estando el espejo abajo. El borde del espejo se rebaja con la herramienta en posición muy excéntrica. Del mismo modo, toda zona saliente de una parábola imperfecta puede tratarse por sobrepresiones sobre el borde interior de la herramienta pasando estadísticamente sobre esta zona ; desde luego, deben variarse suficientemente las amplitudes para evitar un estrago local y empalmar el punto atacado. La presión ejercida debe ser regular sobre todo el contorno de la zona y se trabaja bien entendido, por vueltas completas. Es necesario cierto hábito para lograrlo exactamente, pero se evita el uso de una torta más pequeña.

Retoque de parábolas imperfectas

Es menester cierta práctica de las sombras para interpretar las anomalías con relación a los sólidos diferenciales dibujados en la figura 37. Si la forma de conjunto parece casi lograda, lo que se juzga sobre todo gracias al aspecto medio (figura 37B), se hará una medida de aberración longitudinal sin diafragma para saber si hay que continuar el trabajo de la misma manera o por el contrario volver hacia la esfera como se ha visto anteriormente. Entretanto, independientemente de la corrección de conjunto, cuenta la exactitud de la forma ; damos en la parte inferior de la figura 42, tres ejemplos de retoques de formas defectuosas tomadas entre las más frecuentes.

Trataremos de corregir una forma exacta[11] ; es más seguro, especialmente para el principiante, hacer al menos sumariamente, un par de medidas sobre cada zona con el diafragma Couder. Para no hacer un cálculo completo para cada retoque, acostumbramos operar en la forma expeditiva siguiente, que es suficiente para terminar un espejo estándar :

Se han encontrado por ejemplo, las medidas siguientes sobre las zonas 1, 2, 3, 4 respectivamente :

Valores hallados	**28,03**	**29,64**	**31,15**	**31,81**
teóricos	**0,14**	**1,08**	**2,28**	**3,46**

La segunda línea está copiada del diafragma de la figura 38. Para fijar ideas tomaremos una aberración cero para la zona 3, en la cual se obtienen las mejores medidas ; es necesario entonces restar de todas las cantidades la constante 28,87 obtenida de restar 31,15 menos 2,28 ; resultando : **-0,84 0,77 2,28 2,94**

Restémosles los valores teóricos a estas cantidades : **-0,98 -0,31 0,00 -0,52**

Vemos que todas nuestras medidas, excepto aquella realizada sobre la zona 3 tomada como cero, presentan desviaciones negativas ; por lo tanto es especialmente la zona 3 la defectuosa ; para repartir mejor las desviaciones, agreguemos otra constante y obtendremos así una segunda aproximación. Sumémosle 0,4 a la tercera línea ; resultará entonces : **-0,44 1,17 2,68 3,34**

Restémosles los valores teóricos a estas cantidades : **-0,58 0,09 0,40 -0,12**

Para retocar el espejo, basta un croquis cualitativo de semimeridiano. Se lo traza a pulso y no a escala sobre el cuaderno de retoques (figura 43) haciendo el sencillo razonamiento siguiente : las abcisas (horizontales) representan las alturas de las zonas ; 4 paralelas a las ordenadas (verticales), representan esquemáticamente los límites de las cuatro ventanas ; las ordenadas darán la importancia del relieve. Vemos que nuestra zona 1, tiene un radio de curvatura más corto en 0,58 con respecto a la superficie de referencia elegida. Esto quiere decir que la zona 1 está muy excavada y que el semilado derecho que hemos bosquejado sube ; para la zona 2 la desviación positiva es de sólo 0,09 y nuestra zona trazada es prácticamente casi paralela al eje de las abcisas, bajando un poco ; para la zona 3 el residuo es fuertemente positivo : 0,40 y nuestra superficie de onda desciende sensiblemente ; por último, en la zona 4, tenemos un residuo de -0,12 y la curva nuevamente sube un poco.

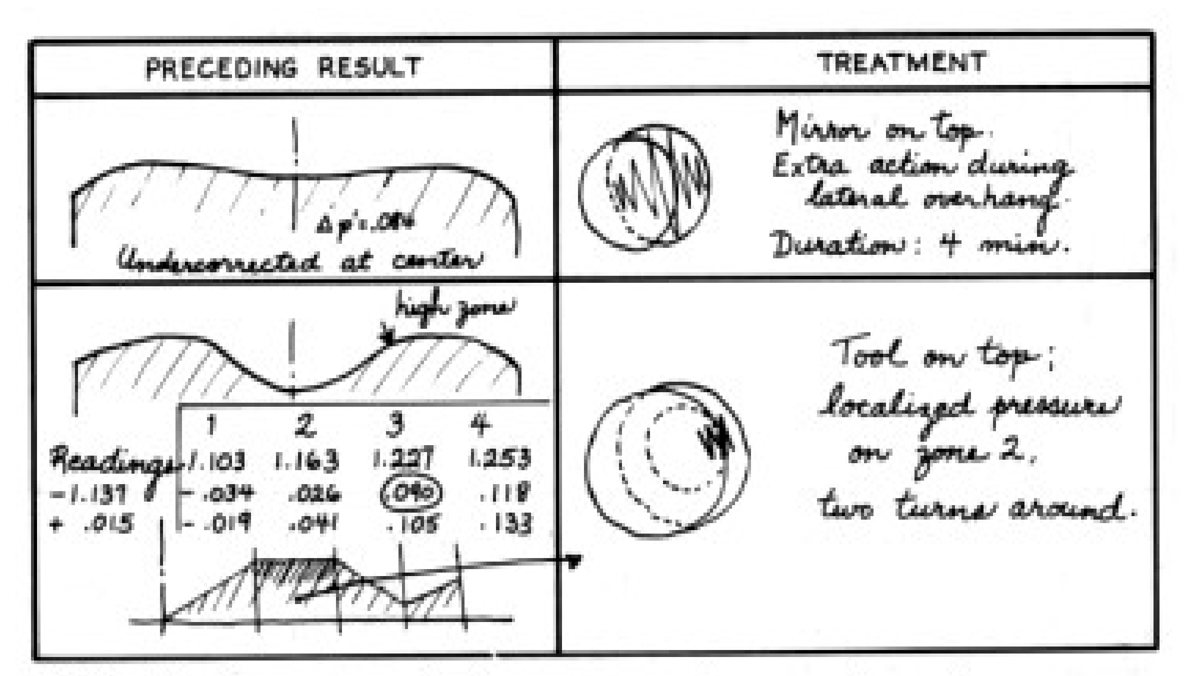


Fig 43. Fragmento de un cuaderno de retoques

La línea quebrada obtenida, esquematiza cualitativamente la forma del semidiámetro derecho del espejo con relación a una línea horizontal que representa la superficie parabólica de referencia. Se ve inmediatamente (figura 42) que existe una zona alta que corregiremos actuando principalmente sobre la zona 2, con sobrepresiones del borde de la herramienta, por ejemplo. Cuando las desviaciones longitudinales no sean más que de 1 ó 2 décimos de milímetro habrá llegado el momento de hacer medidas cuidadosas y un cálculo completo.

Reducción de las aberraciones al plano focal

Para saber si el espejo es bueno, debemos valorar sus aberraciones en el plano focal y determinar la onda emergente cuando recibe una fuente luminosa muy alejada. Los residuos que nos quedan entre los enfoques longitudinales hallados experimentalmente después de rebajarlos en cierta constante bien elegida, y la aberración teórica h_m^2/R de una parábola perfecta, son los defectos propios del espejo y miden su aberración longitudinal en el centro de curvatura : Λ_C [12].

Las aberraciones longitudinales correspondientes Λ_f que el espejo presentará en el foco, serán cuatro veces más pequeñas. En la figura 44 se ve el rayo real HMI emerger del punto H y cortar el eje a una distancia longitudinal del rayo ideal H'P igual a PI, que es justamente esta aberración longitudinal Λ_f.

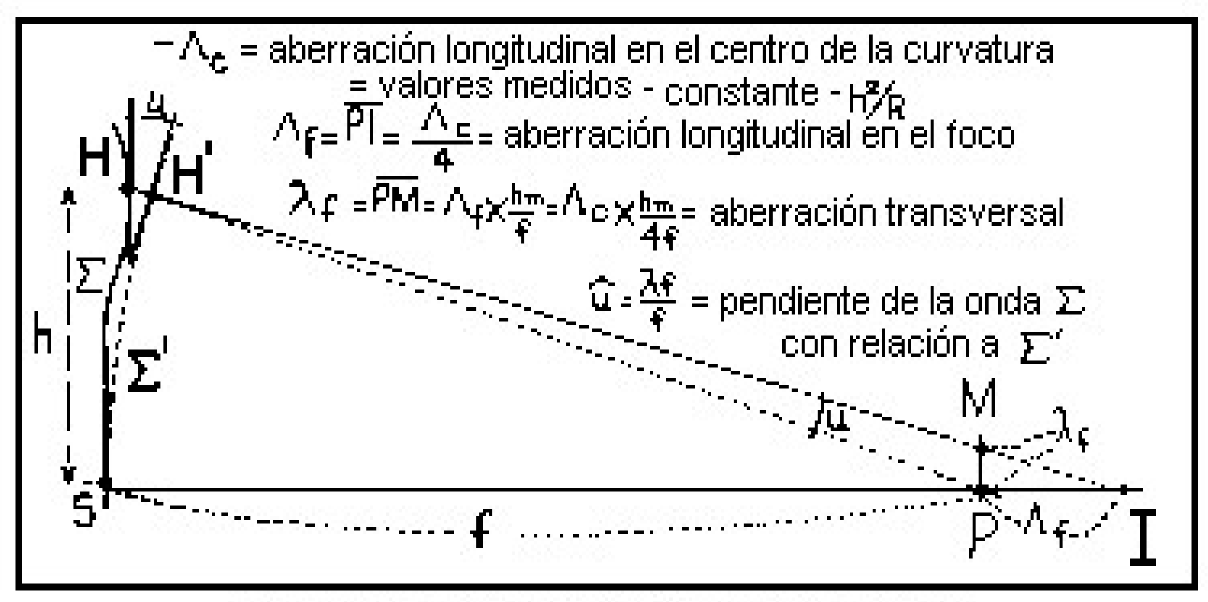


Fig 44. Relaciones entre las aberraciones

El segmento PM es la aberración transversal correspondiente, llamada λ_f. Como en la realidad PI y especialmente HH' son insignificantes frente a la longitud focal *f*, se obtendrán las λ_f con todo el rigorismo útil (aquí no hacemos matemáticas sino un espejo) multiplicando los residuos longitudinales en el centro Λ_C por las alturas de incidencia h_m y dividiendo los resultados por 4f . En resumen, $\Lambda_C h_m/4f$.

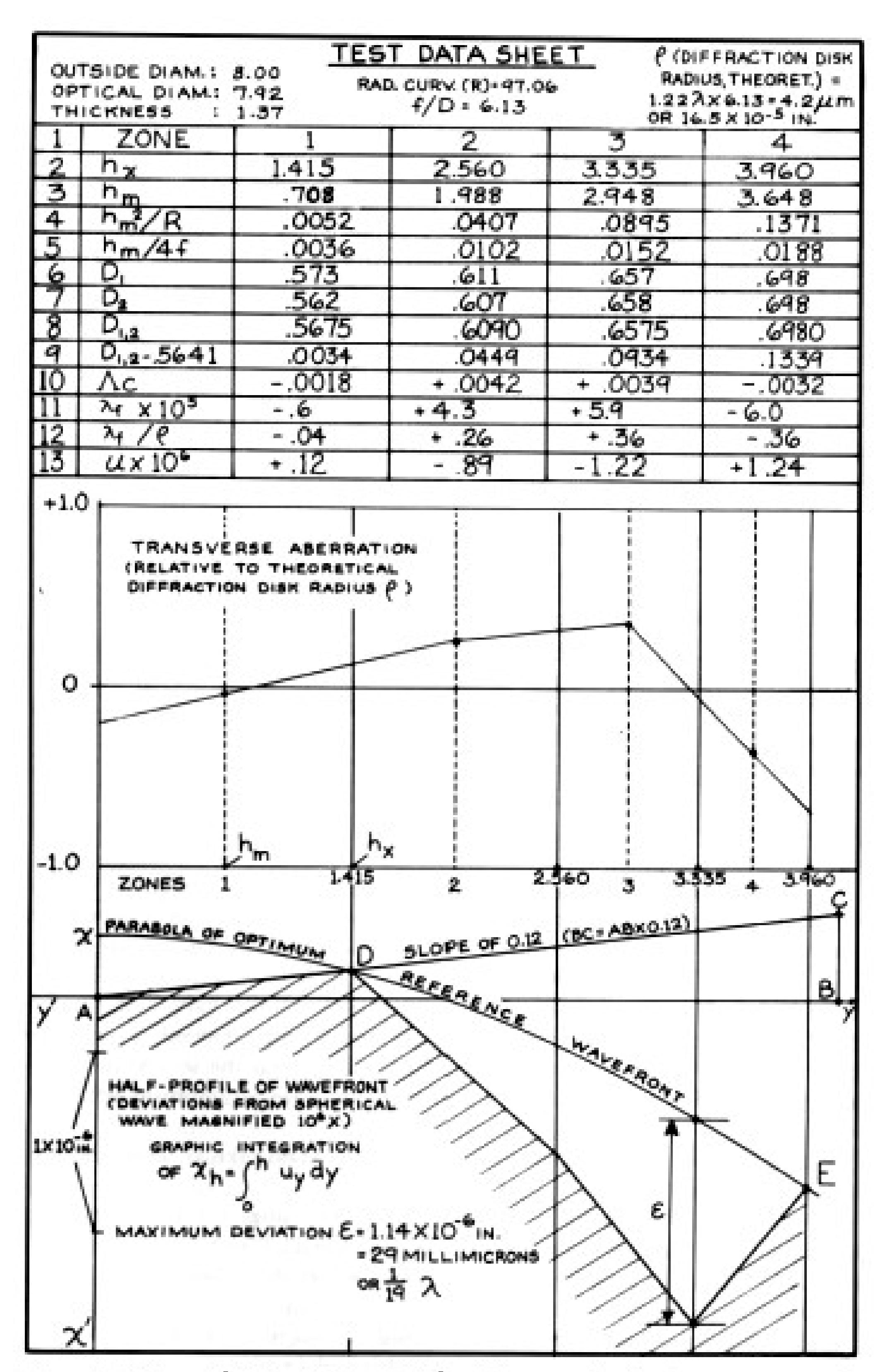
La tangente en el punto H de la onda real Σ hace con la tangente en el punto H' de la onda ideal Σ', el mismo ángulo u que los rayos emergentes correspondientes HM y H'P ; este ángulo u que mide la pendiente de la onda Σ en el punto H, se obtiene evidentemente

(siempre con la aproximación necesaria) dividiendo la aberración transversal λ_f por la longitud focal *f*. Uniendo extremo con extremo, estas pendientes nos dibujarán esquemáticamente el perfil de la superficie de onda y podremos valorar sus defectos. Para hacer todo esto basta conocer las cuatro operaciones elementales.

El boletín de control

La figura 45 es un ejemplo del boletín de control de un espejo construido en el taller de la *Comission*, cuya confección explicaremos a continuación :

Pasaremos por alto las distintas constantes mecánicas y ópticas del espejo que son de interpretación inmediata. Las cuatro primeras líneas del cuadro están calculadas según el diafragma de zonas ; sabemos qué significan. Son fáciles de calcular anticipadamente (el espejo quizá no resulte bueno al primer intento) : en la línea 5, los factores de altura de incidencia : $h_m/4f$ que darán las λ_f mediante una única multiplicación por Λ_C.



TEST DATA SHEET

OUTSIDE DIAM.: 8.00
OPTICAL DIAM.: 7.92
THICKNESS : 1.37

RAD. CURV. (R) = 97.06
f/D = 6.13

ρ (DIFFRACTION DISK RADIUS, THEORET.) = 1.22 λ x 6.13 = 4.2 μm OR 16.5 x 10⁻⁵ IN.

1	ZONE	1	2	3	4
2	h_x	1.415	2.560	3.335	3.960
3	h_m	.708	1.988	2.948	3.648
4	h_m^2/R	.0052	.0407	.0895	.1371
5	$h_m/4f$	.0036	.0102	.0152	.0188
6	D_1	.573	.611	.657	.698
7	D_2	.562	.607	.658	.698
8	$D_{1,2}$	.5675	.6090	.6575	.6980
9	$D_{1,2}$-.5641	.0034	.0449	.0934	.1339
10	Δc	-.0018	+.0042	+.0039	-.0032
11	$\lambda_f \times 10^5$	-.6	+4.3	+5.9	-6.0
12	λ_f/ρ	-.04	+.26	+.36	-.36
13	$u \times 10^6$	+.12	-.89	-1.22	+1.24

Fig 45. Facsímil del boletín de control de un espejo

Se anotan en la línea 6 el promedio de por lo menos cuatro buenas medidas efectuadas sobre un diámetro Φ_1 del espejo ; lo mismo para el renglón 7 relativo a un diámetro Φ_2, perpendicular a Φ_1 (entre ambas series se hace girar el espejo un cuarto de vuelta sobre su plano, con las precauciones de práctica). Las diferencias sistemáticas entre ambas series no pueden servir más que para apreciar el astigmatismo de conjunto del espejo, puesto que la distancia espejo cuchillo probablemente cambió entre ambos ajustes, pero el astigmatismo zonal podrá ponerse de manifiesto. Si las anomalías longitudinales transformadas en λ_f no alcanzan el radio de la mancha de difracción (ver más adelante), se calculará : línea 8, los promedios de las líneas 6 y 7 que serán consideradas como representativas del espejo medio. Para el renglón 9, una pequeña dificultad : hay que encontrar por ensayos, la constante a rebajar a los valores de la línea 8 para encuadrar lo mejor posible, las desviaciones con referencia a la parábola teórica. Cuando el enfoque está bien elegido deben obtenerse en el renglón 10 los residuos longitudinales (renglón 9 menos renglón 4) que después de una multiplicación por los factores de la altura de incidencia (renglón 5) darán en la línea 11 las máximas aberraciones transversales λ_f iguales y de signos contrarios. Estamos ahora exactamente sobre el plano del círculo de menor aberración ; una ojeada sobre la línea 5 nos muestra que hay que permitir desviaciones longitudinales aproximadamente 5 veces menores sobre la zona 4 que sobre la zona 1 para obtener este resultado.

La línea 12 es la de las aberraciones transversales reducidas, es decir tomadas con el radio ρ de la mancha de difracción como unidad que vale, como sabemos :

$$\rho = 1{,}22\lambda \times \frac{f}{D}$$

Por último, sobre la línea 13 figuran los ángulos u que serán tomados con el signo menos en un factor de multiplicación suficiente para dibujar el perfil ; aquí tomamos el factor de un millón (10^6), cuidando los errores de coma. El ejemplo presentado debe bastar para fijar el orden de magnitud de los diversos valores.

Sobre los dos gráficos llevamos en abcisas las alturas de incidencia h a la escala de tamaño ; en un sentido más general este eje será (una vez no hace costumbre) el de las y. Cuatro paralelas a las ordenadas marcarán los límites exteriores (línea 2) de las 4 zonas.

El primer gráfico no es más que la traducción de la línea 12 ; en ordenadas se han marcado $+\rho$ y $-\rho$ que significan los límites de la mancha de difracción teórica.

Las ordenadas del perfil inferior muestran la desviación HH' (figura 44) entre la superficie de onda esférica ideal de vértice S y c entre P y la superficie de onda real Σ teniendo el mismo vértice S. En el punto H la distancia HH' = X_h está dada por :

$$x_k = \int_0^k u_y dy$$

No hay porqué intranquilizarse ; la operación se realiza gráficamente ; ni siquiera hay necesidad de un doble decímetro si se utiliza papel milimetrado. Insistimos repetidamente aun a riesgo de hacer sonreír a los “astutos”.

Entre los límites de la zona 1 tenemos que trazar una pendiente $-u \times 10^6$ (línea 13) igual a + 0,25 (la “curva” sube cuando el coeficiente es positivo y desciende cuando es negativo) ; a partir de un origen arbitrario A del eje de las ordenadas x’x (que al mismo tiempo es el eje del espejo) tomamos una longitud AB en las abcisas igual, por ejemplo, a 100 mm, de B subimos en una cantidad BC equivalente a 25 mm y unimos AC ; esta es nuestra primera pendiente que, desde luego, hay que detener en el punto D donde atraviesa el límite de las zonas 1 y 2, punto que sirve de origen para trazar la segunda pendiente -0,49 al límite de la zona 2 y así se continúa hasta la zona 4 en el borde del espejo.

Esta línea quebrada no tiene, evidentemente (como la pintura moderna), más que una relación lejana con el ser físico infinitamente complejo que es la superficie de onda y que no podemos analizar con cuatro pendientes, pero que la representa en su aspecto de conjunto. Recordemos que se pueden representar los continentes en un atlas escolar.

Por otra parte, este perfil anguloso da los límites superiores de las desviaciones ; el error cometido es entonces en el sentido de un mayor rigor. Falta comparar esta superficie de onda convencional con la parábola que se aparte lo menos posible ; generalmente no es la esfera de meridiana Σ’ tomada como referencia, que es sobre nuestro croquis una recta paralela al eje de las abcisas y’y (puesto que el plano del círculo de menor aberración no tiene una virtud particular). Tenemos el derecho de buscar el centro de una onda mejor ; dicho de otro modo, de ajustarla ; esta onda, de radio un poco diferente, debe tocar nuestro perfil quebrado en los dos puntos más salientes que son aquí D y E. Sobre el croquis, el perfil de la esfera, cuyos apartamientos con relación a Σ’ son funciones del cuadrado de la altura de incidencia, será un arco de parábola de eje x’x obligada a pasar por los puntos conocidos D y E. Con esto los “astutos” podrán hacerse la ilusión de ser sabios determinando el coeficiente a de su ecuación ($x = a + cy^2$) ; los otros lo trazarán sin grave inconveniente. No queda sino medir la más grande desviación de tautocronismo ε entre la línea quebrada y la parábola. Antes de compararlas con la longitud de onda de 0,56 μm de la luz más sensible para el ojo, no olvidemos que esto está ampliado un millón de veces ; sobre nuestra escala de ordenadas, 1 cm representa 0,01 μm o sea 1/56 de onda

Interpretación del boletín de control

Esto interesa no solamente al óptico aficionado, sino también a quien encarga un objetivo, del cual debe siempre exigir y comprender su boletín.

Hay un doble criterio al cual debe satisfacer un buen objetivo, que fue enunciado en *Lunettes et télescopes* por A. Danjon y A. Couder, página 522 :

1. *“El radio del círculo de menor aberración es comparable al de la mancha de difracción teórica y en promedio, las aberraciones transversales reducidas son inferiores a la unidad.*

2. *El mayor apartamiento de tautocronismo es como máximo igual a un cuarto de onda y la mayor parte de la superficie del espejo presenta defectos notablemente menores.”*

Los dos gráficos del boletín de control permiten juzgar si el espejo responde bien a este doble criterio. En general, en un pequeño espejo, la primera condición es la más difícil de cumplir. Un boletín sumario que no indique más que las λ_f del cálculo inmediato puede prestar aquí servicios importantes. Muy a menudo, uno se impone para el segundo criterio un límite más severo ; hemos señalado porqué. Del taller de la *Commission* no sale ningún espejo si su boletín no determina los $\lambda_f / \rho < 1$ y desviaciones de tautocronismo inferiores a $\lambda / 10$; este límite está todavía bien lejos de ser alcanzado[13]. Con tan pequeñas tolerancias, es inútil buscar un defecto cualquiera sobre el cielo observando las estrellas ; lo que puede descubrirse es que el espejo está mal montado o mal centrado. Agregamos, para los que solo son compradores, que no hay que fiarse de una simple fotografía tomada en el aparato de **Foucault**, producida por el óptico y cuyos contrastes pueden ser trucados hasta el infinito. Si existe un boletín de control completo, hay que controlar la escala de ampliación de las ordenadas, que generalmente se toma igual a 10^5 solamente, para mostrar pendientes menos espantosas ; a menudo también con el evidente propósito de escribir defectos dos veces menores, el óptico da el perfil de los accidentes sobre el vidrio y no sobre la onda ; hay que saber descubrir estos pequeños abusos de confianza y exigir precisiones según las necesidades. Si el boletín es incompleto y no indica, por ejemplo, más que los apartamientos longitudinales Λ_C, hay que tomarse el trabajo de calcular rápidamente con la regla, los λ_f correspondientes para compararlos al radio de la mancha de difracción. El espejo principal simboliza nuestra esperanza astronómica ; no hay que aceptarlo a ciegas. Por el contrario, a menos que sean formidables, los defectos visibles de abrasión : gris, huellas, rayaduras, escamas, no perjudican más que las faltas de belleza, generalmente benignas sobre la imagen. La parte más delicada de nuestra empresa está terminada ; quedaríamos descorazonados si hubiésemos acobardado con descripciones demasiado completas a los principiantes seducidos por el trabajo del vidrio. Todos los detalles dados no son indispensables para hacer un espejo pasable, pero sí lo son para uno perfecto ; no hemos querido limitar el campo de acción del aficionado cuidadoso y perseverante que tiene la posibilidad y por lo tanto el deber, de realizar y asegurarse un trabajo impecable. Esta disciplina contribuirá a volverlo digno de poseer un potente telescopio y le ayudará a dominar la situación, infinitamente más delicada, de la

observación de una imagen sobre el cielo, perturbada por los abominables remolinos atmosféricos.

[1] Después de ciertas "hazañas" de operadores capaces de tallar un espejo de 160 mm en 6 horas, muchos aficionados hacen una cuestión de honor en pulir como locos ; indicamos a los más furiosos que las máquinas americanas modernas (usando la barnesita) pulen un bloque de 180 mm de diámetro entre 1 y 3 minutos ; pero la óptica astronómica es otra cosa.

[2] A. Couder, Construction d'un miroir de 1,20 m (construcción de un espejo de 1,20m) y Lunettes et Tèlescopes (Anteojos y Telescopios).

[3] Un trozo de vidrio frotado contra otro con la interposición de Carborundum 280 ó 400.

[4] La razón de crecimiento de área es 28p cm2 = 88 cm2. Los radios hx son: , , , . En esta forma las áreas de las franjas circulares serán : Z4 = Z3 = Z2 = 2Z1.

[5] El número de zonas se determina por el número entero que dé la siguiente fórmula :   con r en mm.

[6] Esta media aritmética hm no es idéntica a la hm de A. Couder, Lunettes et télescopes, pág. 533, que se define como el radio cuyo cuadrado es igual a la mitad de los cuadrados de los radios interior y exterior de la zona, y que permite una reducción teóricamente más correcta ; no obstante la significación física del enfoque fotométrico de la zona, nos parece corresponder a la mitad de la ventana (las orlas de difracción afectan simétricamente ambos bordes y el observador iguala especialmente las partes centrales de la porción). Las diferencias que resultan de esta divergencia de interpretación son de todos modos pequeñas ; con el diafragma estándar, ellas representan apartamientos transversales inferiores al micrón. Cada uno elegirá según su criterio.

[7] Défauts des instruments réels (Defectos de los instrumentos reales). Cahiers de Physique.

[8] La superficie plana se utiliza para representar la esfera, ya que así es como se le observa en el método de las sombras.

[9] He aquí un método divertido para desconcertar a un confiado "determinista", es decir, al operador que cree poder predecir siempre el efecto producido por una acción determinada.

[10] No hay que olvidar que Foucault pulía con papel, técnica que no se presta para la aplicación de otros procedimientos mejores.

[11] Ellison lanzó la moda de los espejos parcialmente parabolizados (por ejemplo, 90% de h2/R) para tomar en cuenta un eventual efecto térmico que no podría sino excepcionalmente compensar este defecto voluntario permanente ; en todo caso, es muy cómodo para justificar las torpezas, que tienen entonces el aspecto de haber sido realizadas intencionalmente.

[12] Recordamos que tomamos las notaciones principales de Lunettes et télescopes e invitamos a los lectores que tienen un mínimo de conocimientos matemáticos a seguir sobre el original (numeral 115), el principio del método.

[13] El promedio de las desviaciones de tautocronismo de los 18 primeros espejos del taller es de .

3. El espejo plano diagonal

Espejo o prisma; cualidades exigidas

Para hacer accesible el plano focal se desvía el haz principal mediante un prisma de reflexión total o un espejo plano inclinado generalmente a 45º con respecto al eje del espejo principal.

Los prismas tienen ventajas nada despreciables: con haces cuya abertura no exceda 1/5 eliminan la conservación de una superficie metalizada particularmente expuesta al depósito de rocío. Son además piezas comunes relativamente fáciles de hallar. Desgraciadamente la calidad exigida en la aplicación que encaramos es difícilmente lograda por los prismas ordinarios destinados corrientemente a inversores de imágenes en los aparatos de poco aumento. Las exigencias para el plano de la cara hipotenusa de un prisma son casi las mismas que las correspondientes a un espejo plano; lo que complica aun más la cuestión en el caso de un prisma es que los defectos pueden acumularse con los de las caras de entrada y de salida, con los errores de inclinación de las caras entre sí y con los defectos internos del vidrio. Por lo tanto un buen prisma de más de 40 mm de arista en el ángulo recto es un objeto muy raro. En todos los casos el prisma actúa como una lámina de caras paralelas de un espesor igual a su lado menor; introduce entonces una sobre corrección esférica y cromática de ningún modo despreciable para una travesía de unos 40 mm de vidrio con un haz de abertura de 1/6 o más. Por el contrario, un espejo plano no introduce ninguna aberración. En razón de la relativa proximidad de la imagen, del orden de un décimo de la longitud focal del espejo principal, en principio pueden tolerarse errores de pendiente 10 veces más grandes que sobre aquél, debiendo prestarse especial atención a la condición relativa de los apartamientos de tautocronismo. Para satisfacer la regla de Rayleigh, teniendo en cuenta los defectos del vidrio y la incidencia a 45º, consideramos tolerable una anomalía de $\lambda/12$ aproximadamente. Pero en razón de la incidencia a 45º no existe la posibilidad de elegir como en el caso del espejo principal, entre muchas superficies de referencia de curvaturas poco diferentes; es necesario que la curvatura sea nula pues de otro modo el haz reflejado es astigmático. Si admitimos para este último defecto una tolerancia de $\lambda/5{,}5$ sobre la onda[ix[1]] vemos que sobre el vidrio, no podremos tolerar una curvatura regular cóncava o convexa si excede de $\lambda/8$.

Muy pocos telescopios en servicio poseen un plano de esta calidad. Son frecuentes los defectos de una franja entera y hemos tenido ocasión de comprobar en el plano de un buen telescopio de 30 cm una convexidad de 9 franjas. No es dudoso que parte de la mala reputación de los reflectores newtonianos de la industria provenga de tales negligencias.

Forma y dimensiones del espejo plano

Si se proyecta el haz en ángulo recto, la superficie de obstrucción mínima se obtiene cortando una lámina de vidrio con un cilindro cuyas generatrices forman un ángulo de 45º con el plano del vidrio. El contorno de esta superficie es pues, una elipse (figura 46A) cuyos ejes son *a* y *a* .

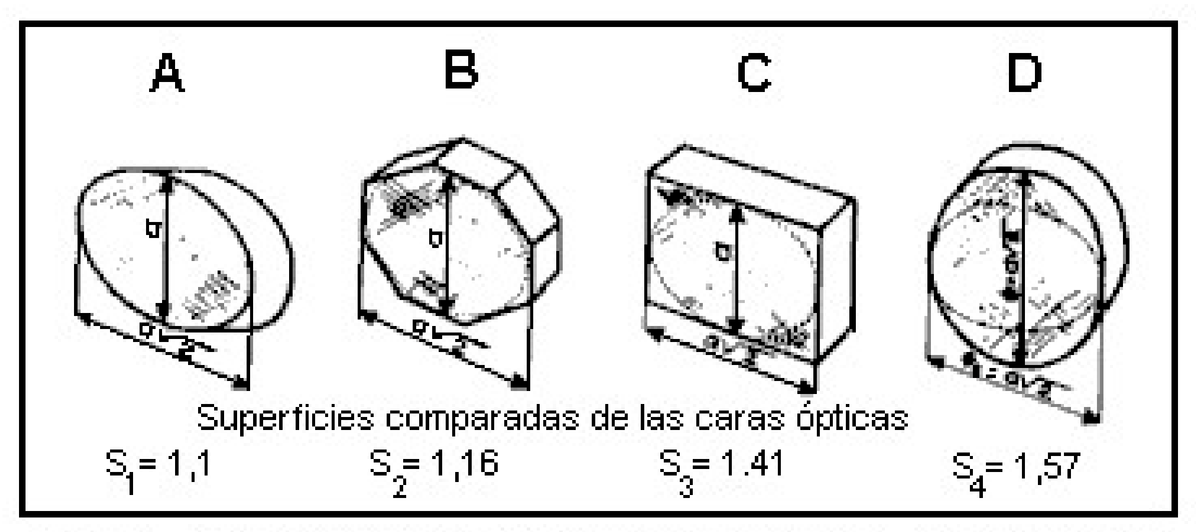


Fig 46. Diversas formas para el espejo secundario

Esta "rodaja de salchichón" no es fácil de lograr en la práctica y la forma óptica de semejante espejo raramente resultará tan buena como la de un vidrio de espesor uniforme. Casi siempre, el aficionado se contentará con un espejo cuyos bordes estén a escuadra con sus caras.

Conforme al modo de fabricación adoptado, el cuerpo más fácil o más ventajoso, tendrá el contorno hexagonal (figura 46B), rectangular (figura 46C) o circular (figura 46D). Aun en este último caso, la obstrucción suplementaria en el haz incidente es un argumento de poco peso frente a la posibilidad de obtener una superficie de mejor calidad.

Para determinar el valor de *a* del eje menor de la elipse útil (figura 46), es necesario conocer cuatro datos (figura 47):

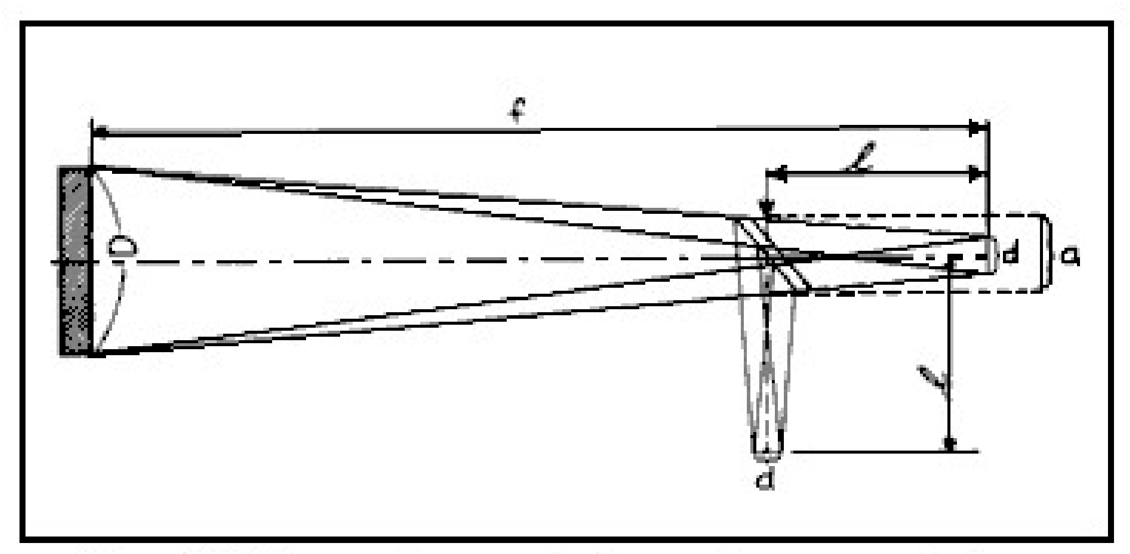


Fig 47. Dimensiones del espejo secundario

- El diámetro óptico D del espejo principal
- La longitud focal f del espejo principal
- La distancia l entre la intersección del eje con la superficie del espejo plano y el plano focal
- El diámetro d del campo que se desee cubrir en plena iluminación.

La distancia l es igual al radio exterior del tubo previsto para el telescopio (o la mitad del lado si este es un cuadrado), más la longitud del portaocular completo cuando está hundido al máximo, mas cierta distancia libre entre el plano focal y la base del portaocular; en la actualidad el plano focal se hace casi siempre exteriormente accesible. Es pues necesario que este plano emerja del instrumento cuando el portaocular está hundido a fondo. Si se piensa solo en observaciones visuales, basta permitir el enfoque con los más fuertes oculares negativos; con las actuales monturas de doble penetración es suficiente un espacio libre del orden de 1 cm. Pero si se prevé realizar fotografías en el foco, la distancia libre debe aumentarse en el espesor de la cámara; en general, la interposición de todo aparato o accesorio que tienda a acortar el tubo, impone más grandes distancias libres y como consecuencia, espejos planos secundarios más grandes. Es conveniente no tratar de interponer un helioscopio polarizador o un inversor a prismas si estos accesorios no cuentan con una lente divergente destinada a alejar el foco en la cantidad deseada.

Falta determinar el diámetro *d* del campo que se desee cubrir en plena iluminación. Para la mayor parte de las observaciones visuales puede uno contentarse con el diámetro de la luna que vale angularmente 31′, equivalente en el plano focal a un diámetro lineal de 9 milésimos de la longitud focal[x[2]] (11 mm en el foco de un telescopio de 1,2 m de distancia focal). Si se desean tomar fotografías en el foco con un campo lo más extenso posible, el límite razonable lo fijará la importancia de las aberraciones extra axiales del espejo parabólico, recordando que las grandes nebulosas desbordan el campo usual de un telescopio de mediana potencia. El diámetro de las más pequeñas estrellas que pueden

registrarse fotográficamente en el foco de un telescopio de mediana potencia, es aproximadamente de 35 μm. Debemos ser menos exigentes en el borde del campo; fijemos como límite tolerable para la longitud radial del penacho debido a la coma y al astigmatismo, el valor de 10 μm. La tabla siguiente, calculada con este dato, indica el diámetro d del campo en minutos de arco y en milímetros en el plano focal, para distintos espejos de aficionados.

D= f/D=	5		6		7		8	
150 mm	103’	22,5 mm	116’	30,4 mm	130’	39,7 mm	138’	48,2 mm
200 mm	80’	23,3 mm	92’	32,1 mm	102’	41,5 mm	110’	51,1 mm
150 mm	66’	24,0 mm	76’	33,2 mm	86’	43,8 mm	92’	53,5 mm
300 mm	55’	24,0 mm	64’	33,5 mm	73’	44,6 mm	80’	55,9 mm

En el caso de un pequeño espejo poco abierto, la adopción de un campo semejante puede conducir a una obstrucción central prohibitiva. Si deseamos hacer observaciones visuales, recomendamos un dispositivo que permita el reemplazo del espejo secundario empleado en fotografía, por otro más pequeño.

En conocimiento de los cuatro datos necesarios, podemos dibujar el plano del telescopio a escala de ½ por ejemplo, trazando los rayos emergentes que limitan el campo útil (figura 47); basta medir el diámetro del haz a la distancia l del plano focal para tener el eje menor de la elipse del espejo plano; el eje mayor recordemos, vale 1,4142 veces el menor.

También puede obtenerse el valor de a del eje menor por la fórmula:

Ejemplo. Se desea conocer el valor del eje menor del espejo plano del telescopio estándar f/D = 6 para el cual se tiene D = 200 mm, f = 1200 mm, l = 160 mm; de acuerdo con el tubo estándar y para las observaciones visuales comunes, d = 11 mm, equivale al diámetro de la Luna en el plano focal y se tendrá entonces:

Otro ejemplo. La misma pregunta con un telescopio de 300 mm a f/D = 7 que se desea emplear para fotografías de larga exposición en el foco, sabiendo que el diámetro exterior del tubo del telescopio mide 350 mm, que la montura de enfoque entrada a fondo mide 50

mm, y que la cámara que se instala tiene 40 mm de espesor. Si se desea un espacio libre suplementario de 10 mm, se tendrá:

l = 175 + 50 + 40 + 10 = 275 mm.

La tabla anterior nos da: d = 45 mm. Se tiene pues:

.

Control interferencial de los espejos planos

Sea Una lámina de aire de espesor e (figura 48A) comprendida entre dos superficies ópticas. Un rayo luminoso de incidencia *I* tal como el S, al llegar sobre la lámina de aire sufre una primera reflexión parcial en A en el pasaje del vidrio al aire, dando origen al rayo reflejado R; luego, una segunda reflexión en B en el pasaje del aire al vidrio, dando origen al rayo reflejado R'. Estos dos rayos R y R' pueden interferir; por ser las reflexiones en A y B de naturaleza diferente, resulta una diferencia de fase de $\lambda/2$, a la cual debe agregarse el camino suplementario: 2e cos i recorrido por el rayo R'. Para una diferencia de marcha de $\lambda/2$ o un número impar de $\lambda/2$, la interferencia es total; si la lámina de aire tiene un espesor variable, los puntos de espesor apropiado aparecerán oscuros y se verán franjas localizadas en la lámina de aire.

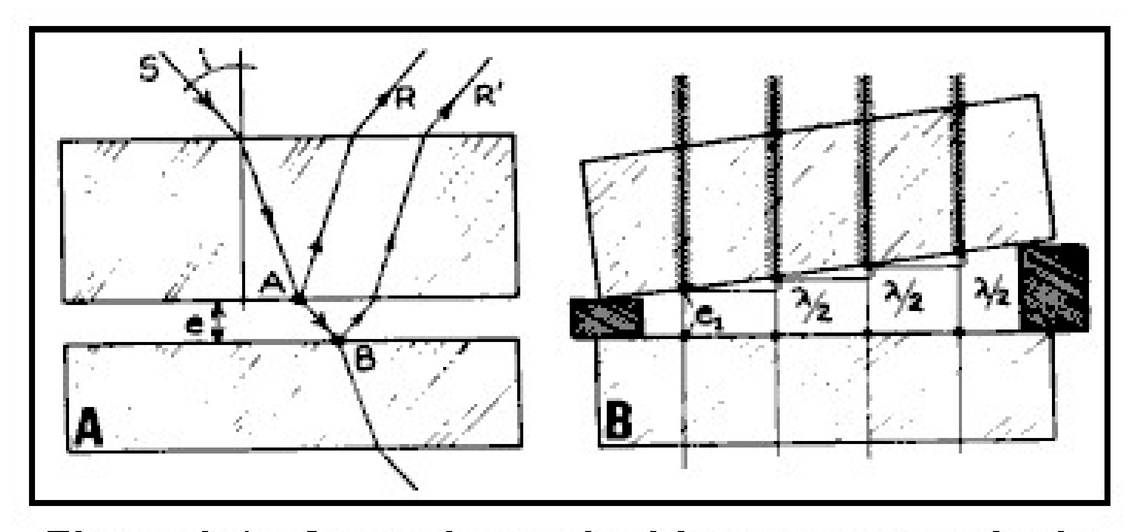


Fig 48. Interferencia producida en un espacio de aire

Un caso particular importante que nos interesa directamente es aquel en el cual las caras de la lámina de aire son planas y forman entre ellas un ángulo muy pequeño; se tiene

entonces una cuña de aire (figura 48B). Si la incidencia es normal, cada vez que el espesor de la cuña aumenta en $\lambda/2$ a partir de cierto espesor para el cual la interferencia es completa, se verá una nueva franja, puesto que el retardo se ha aumentado en λ. Esta franja es evidentemente una recta paralela a la arista de la cuña, puesto que este es el lugar geométrico de los puntos de igual espesor. Entre dos puntos del vidrio donde se cuentan K franjas, puede decirse que el espesor ha variado en $k\lambda/2$. Si estamos seguros de la planicidad de una de las caras de la cuña (calibrador patrón controlado por otro método), podemos interpretar directamente las alteraciones de las franjas de igual espesor con relación a la línea recta, como defectos de planicidad de la segunda cara de la cuña; las franjas nos darán un medio preciso para controlar la planicidad de una superficie óptica, con la única condición de que dispongamos de un calibrador de referencia.

Práctica del control interferencial de los espejos planos

En los talleres industriales se practica el control interferencial simplemente a la luz del día; en estas condiciones las franjas no son visibles sino para muy pequeños espesores de la cuña y presentan vivas coloraciones del espectro de Newton.

Las superficies deben estar perfectamente limpias y aplicadas con el mayor cuidado directamente la una sobre la otra sin desplazamiento lateral; aun una mano experta no está jamás segura de no haber cometido deslizamientos, cuando el diámetro del vidrio alcanza 5 cm. Además existen generalmente, para débiles espesores de aire, fenómenos de adherencia, muy perjudiciales por las contracciones mecánicas que inflingen a las piezas. Si se agrega que es raro el taller que se opera con incidencia normal y tiempos de enfriamiento suficientes después de las manipulaciones del calibrador y del espejo todavía sobre el bloque, se comprenderá que a ésta técnica puede pedírsele apenas una precisión de $\lambda/2$.

Un método más correcto, consiste en utilizar una fuente extensa de luz monocromática, por ejemplo un tubo de descarga vapor de mercurio, de manera tal que la incidencia sea normal. Aun sin aislar la raya verde, es posible ver las franjas se la cuña interponiendo calzas de papel entre las superficies.

Es mejor y a la vez más económico, recurrir a una lamparita de neón, fácil de encontrar en los comercios de electricidad, asociada a un dispositivo imaginado por Fizeau. Tomados la mayor parte de los talleres prácticos siguientes de A. Couder. La lamparita N está colocada en el foco de un lente ordinario plano convexo L (figura 49); la cara plana está vuelta hacia la fuente y la longitud focal no debe ser muy pequeña (40 ó 50 cm para un diámetro de 10 cm).

Si la lamparita es muy voluminosa, puede ponérsela sobre el costado por medio de un prisma cualquiera; en todo caso el pincel incidente debe estar un poco fuera del eje para que el haz de retorno, después de la reflexión sobre el plano, sea directamente accesible. Es

cómodo poder ajustar por medio de tornillos calantes o de tacos, la orientación del aparato o de las superficies examinadas, de manera de realizar la autocolimación sobre el plano.

Las calzas de separación están cortadas de la misma hoja de papel de 1 ó 2 décimos de mm de espesor y su ancho puede ser de 5 a 10 mm. El papel periódico que es relativamente compresible, resulta práctico. Primero se apoya el calibrador sobre una calza, luego se balancea sobre las otras dos sin tocar directamente el espejo. En general, al comienzo se ve un gran número de franjas, lo que indica que la pendiente de la cuña es grande y en consecuencia las calzas son muy diferentes; tirando del espesor grueso o comprimiéndolo, las franjas se ensanchan; cuando sobre el vidrio no hay más que una decena, no hay ventaja en igualar el espesor de las calzas; generalmente las franjas se extenderán en un “matiz uniforme” aun subsistiendo defectos de 1/10 ó 2/10 de franja, mientras que con una interfranja[xi][3] de aproximadamente 10 mm es visible una curvatura o un accidente de ½ mm. Esto representa 1/20 de franja o $\lambda/40$ sobre el vidrio. Más corriente es que existan defectos zonales o una curvatura de conjunto; para evitar errores de interpretación, se comienza por localizar la calza delgada (que es aquella que, comprimida por una ligera presión del dedo sobre el vidrio a plomo, muestra las franjas aproximándose entre sí, puesto que la pendiente de la cuña de aire aumenta) y se la gira frente al operador (figuras 49 y 50); entonces, la franja central representa el corte de la pieza controlada, tal como podría vérsela si sus accidentes fueran aumentados a razón de 0,3 µm aproximadamente ($\lambda/2$ eficaz del neón) para una interfranja (33333 a 1).

Las figuras 49 y 50 presentan ejemplos de aplicación de esta regla. Los accidentes se miden comparando la curvatura de las franjas con el valor de la interfranja, gracias a un hilo que materializa una línea recta, tendido en un arco de alambre de hierro. Cuando el defecto no es de revolución, la interpretación de las franjas no siempre es fácil; es necesario cambiar la dirección de la pendiente mayor de la cuña de aire, cambiando por ejemplo dos calzas entre sí de modo de estudiar otros diámetros. Esto resulta particularmente útil con un vidrio que no es circular (figura 49).

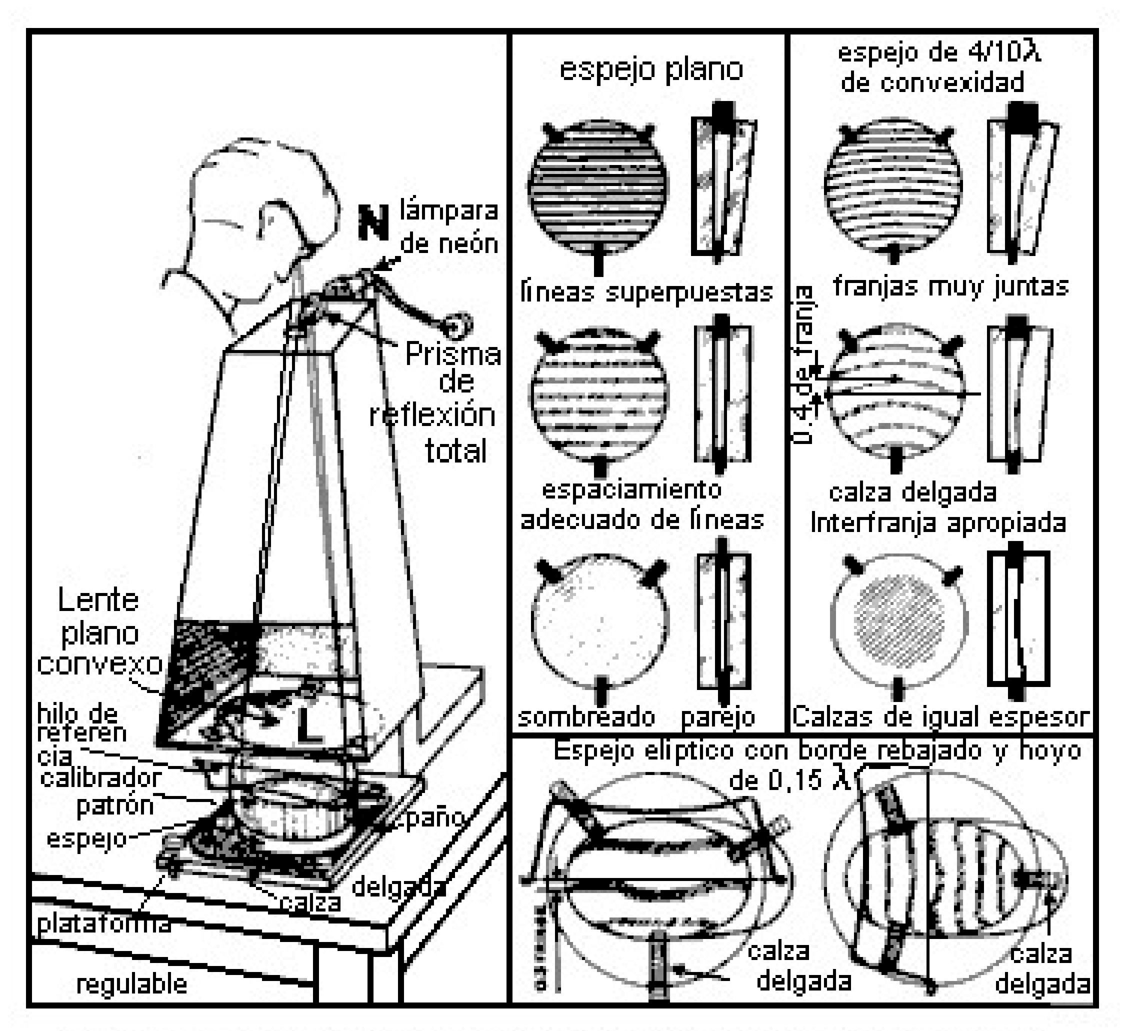


Fig 49. Control interferencial de planos con el montaje de Fizeau

Desde luego, son indispensables las precauciones para el equilibrio térmico de los vidrios y para evitar su calentamiento durante el transcurso mismo de la prueba. Por lo común es necesario una espera de varias horas después de la manipulación del calibrador y del espejo; lo mejor es dejar reposar los vidrios durante una noche y no inclinarse delante del aparato más que durante el tiempo necesario; hasta es conveniente proteger los vidrios del calor del cuerpo por medio de una envoltura de papel ondulado formando una camisa hasta el lente del aparato de Fizeau.



Fig 50. Control interferencial de un espejo plano. Observar el hilo rectilíneo de referencia cerca de la franja central. La mancha blanca es el reflejo de la lámpara d neón. La calza delgada está marcada T. El borde extremo está rebajado.

El método interferencial es de fácil aplicación y de interpretación inmediata, sin cálculos; supone únicamente que se posee un calibrador patrón al menos tan grande como la pieza a controlar y cuya calidad esté fuera de dudas. Uno de los primeros deberes de un grupo de aficionados es poseer un plano patrón y también poder controlar las piezas montadas por sus miembros. El aficionado aislado en provincias puede en rigor, evitar los grandes defectos controlando 3 espejos de dos en dos, con sus dorsos pulidos; obtendrá un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas de resolución inmediata que le dará las indicaciones sobre la curvatura en importancia y signo de los tres vidrios[xii][4]. Desgraciadamente si los defectos son complicados, este método es insuficiente; apenas se le puede aplicar con éxito en el caso de curvaturas regulares. Es preferible el método siguiente.

Control de los espejos planos en combinación con uno esférico

Hay que disponer de un espejo esférico cóncavo auxiliar al menos tan grande como el eje menor del plano a controlar; de hecho, aun para un espejo muy pequeño, no hay interés en descender por debajo de 10 cm de diámetro y 2 m de radio de curvatura. Para el ferviente tallador de espejos, un esférico perfecto bastante grande es una preciosa pieza de referencia; quien no construye más que ocasionalmente un telescopio, no tallará especialmente un espejo esférico; le aconsejamos utilizar su espejo principal, aun cuando ya esté parabolizado, con tal que no tenga un defecto pequeño y neto justamente en el centro. Se verificará, examinando en el aparato de **Foucault** un espejo de 20 cm a f/D = 8 ó aún 6, provisto de un diafragma de 50 mm, que en su parte central puede ser asimilado a un espejo esférico.

Retomemos el dispositivo descrito en "Defectos que no son de revolución" (atrás), a propósito del estudio del astigmatismo del espejo principal y apliquémoslo al examen del espejo diafragmado para verificar que el astigmatismo del montaje es insensible con un fuerte ocular.

Para la interposición del espejo plano dentro del haz, es necesario un soporte especial. La figura 51 muestra un ejemplo realizado con tres tablas, de las cuales la primera sirve de zócalo y está apoyada sobre tres cabezas de clavos y las otras dos forman un diedro, por ejemplo[xiii][5] de 45º, que tiene sus planos materializados por cabezas de clavos que sirven de apoyo al dorso de los espejos cuyo deslizamiento vertical se impide con grandes clavos que los sostienen por el borde. El centro del espejo esférico debe proyectarse evidentemente sobre el centro del vidrio plano.

Para tener suficiente luz, no obstante las tres reflexiones y como el plano en examen está eventualmente en retoque y generalmente no metalizado, es preciso que lo esté el esférico.

La experiencia de **Foucault** practicada en estas condiciones nos revela los defectos zonales del plano si los hay, pero no puede decirnos si el espejo tiene una débil curvatura esférica cóncava o convexa. En efecto, con nuestro montaje, el plano de incidencia es horizontal y el astigmatismo creado por la no planicidad del espejo diagonal se manifestará cerca de la imagen bajo la forma de rectas focales rectangulares, una de ellas, la focal sagital está contenida dentro del plano de incidencia y es pues horizontal con nuestro montaje, pero la otra, la focal tangencial, ortogonal con respecto a la anterior, es vertical como nuestro cuchillo y si este último hace un corte dentro de su plano, observaremos el matiz uniforme como un haz anastigmático. Sin embargo puede ponerse de manifiesto y medirse el astigmatismo con gran precisión por el método de **Foucault** si el aparato está provisto de un cuchillo y de una fuente que puedan girar en su plano; colocando la arista en posición horizontal, puede hallarse otra posición longitudinal de extinción en matiz uniforme correspondiente al enfoque de la sagital, restando de esta segunda medida el

astigmatismo del montaje (posición extra axial de la fuente); la diferencia que queda entre ambos enfoques mide la longitud l del astigmatismo que permite calcular, con la fórmula indicada más adelante, la curvatura del espejo. Pero podemos evitar la transformación de nuestro aparato de **Foucault** simplemente apuntando las focales con un fuerte ocular; la precisión es un poco menor, pero nos familiarizará con una imagen afectada de astigmatismo puro. Como la bolita está pegada contra el ocular y nuestro montaje tiene escasa abertura angular, puede despreciarse el astigmatismo del montaje y obtener la longitud del astigmatismo, simplemente restando uno del otro los dos enfoques hallados para los planos de enfoque que corresponden a cada focal (figura 51). Si se halla que la focal sagital (horizontal) está más próxima del espejo que la tangencial (vertical), significa que el espejo es convexo; por el contrario, si es más alejada, el espejo es cóncavo.

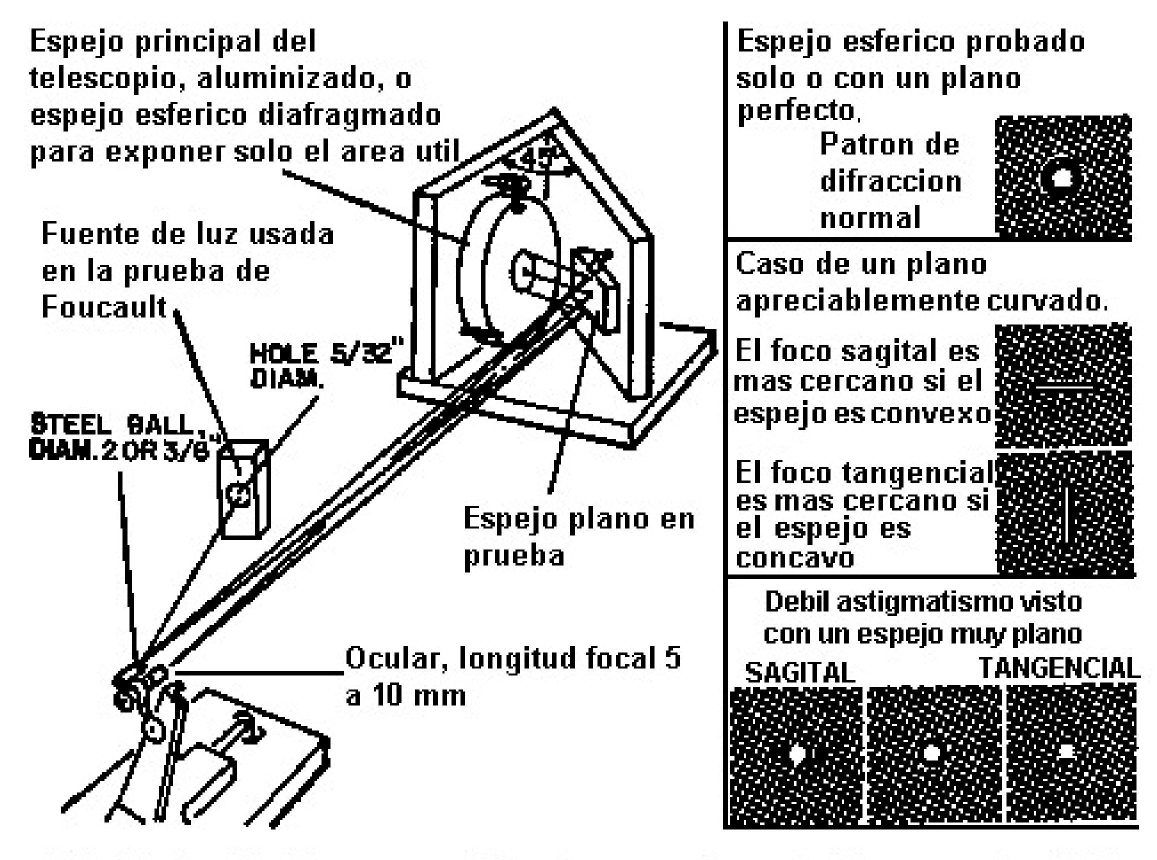


Fig 51. Prueba de una superficie plana con la ayuda de un espejo esferico

Tomamos de A. Couder las siguientes fórmulas[xiv][6]: El radio de curvatura R del espejo casi plano examinado es igual a:

Siendo p la distancia del espejo plano a la imagen vista por el ocular, tomando en cuenta las dos reflexiones y l la longitud del astigmatismo.

Para nuestro montaje, en el cual hemos tomado i = 45º, cos i = la fórmula se transforma en:

Siempre en el caso de la incidencia a 45º, la flecha ε de curvatura del espejo casi plano está dada por:

Siendo D el diámetro del haz útil en el plano del espejo examinado.

Ejemplo: Se ha encontrado una longitud de astigmatismo l de 2 mm entre ambas focales, siendo la focal sagital la más alejada; sabiendo además que p = 3100 mm (espejo de 20 cm a f/8 utilizado como esférico) y D = 50 mm, concluimos que el espejo ensayado es cóncavo y que su radio de curvatura es igual a:

L flecha de curvatura del eje menor es de:

o sea 0,023 μm ó

El método es muy sensible, puesto que el espejo está alejado de la imagen, (p es aquí 20 veces más grande que en el instrumento en servicio) y que el haz pasa dos veces sobre el plano.

Elemento principal

Vidrio de Saint Gobain[xv][7]

La planicidad del vidrio es a menudo encomiada en los tratados de física y en aquellos consagrados a los telescopios para aficionados; seguramente ella es notable para un producto industrial tan trivial. Si se dispone de una suficiente cantidad de trozos de vidrio y de un aparato de control interferencial, no será difícil hallar un trozo bastante grande y suficientemente perfecto como para constituir un espejo diagonal de 20 a 30 mm de eje menor. Lo que hay que desechar en absoluto es la práctica muy frecuente entre los aficionados, que consiste en tomar el primer trozo de vidrio hallado, sin controlarlo; ¡se tiene algo así como una probabilidad sobre 100 de obtener de esta manera un buen plano! Existe casi siempre defectos astigmáticos cuya interpretación es a veces difícil y cuya amplitud alcanza fácilmente a 5 ó 10 franjas sobre 50 mm; es indispensable el retoque de la superficie.

En caso extremo puede bastar el vidrio ordinario de 8 mm de espesor para un espejo diagonal de 30 a 40 mm de eje menor; no obstante se preferirá un espesor de 10 a 15 mm especialmente si el eje menor alcanza a 50 ó 60 mm.

Piezas de óptica recuperadas

Citaremos como principal fuente de espejos planos: los filtros fotográficos realizados especialmente por Carl Zeiss Jena[xvi][8] y por Goertz para las antiguas cámaras de aviación de grandes dimensiones, que se encuentran generalmente a muy buen precio en el mercado de ocasión. Estos filtros están constituidos por dos láminas de caras planas y paralelas de 150 mm de diámetro y 11 mm de espesor o mejor de 180 y 14 mm respectivamente, pegadas, con la interposición de una gelatina coloreada. Por lo general es necesario aserrar la montura para recuperar las láminas, que pueden luego despegarse dentro de una cacerola puesta a calentar. Las caras interiores tienen generalmente defectos de 2 ó 3 franjas sobre todo el diámetro, pero a menudo las caras exteriores no presentan un defecto de más de una franja y si se estudia detenidamente el plano de recorte, se podrá hallar una región bastante grande como para un espejo exacto a $\lambda/10$. En el taller de la *Commission* hemos logrado obtener 4 espejos planos estándar perfectos de una sola plancha de 150 mm. Quienes no tengan el coraje de hacer una prueba óptica, tendrán esta vez mucha mayor probabilidad de obtener un espejo aceptable recortándolo del centro de la cara externa de una lámina de filtro, que recurriendo al vidrio de Saint Gobain. De todas maneras, el retoque es mucho más fácil que si se trata de un trozo de vidrio de Saint Gobain.

Mencionemos también ciertos espejos de forma rectangular provenientes de telémetros, que son exactos a 1/10 de franja en general. Siempre hay que guardarse bien de generalizar tales comprobaciones sin controlar; las piezas industriales terminadas con esta precisión son muy raras; prácticamente, esta precisión jamás se encuentra en los prismas de reflexión total.

Retoque de la superficie de los espejos planos

Si se ve que la cara de un trozo de vidrio o de un filtro puede utilizarse tal cual, o retocarse en el pulido, hay que cuidarse de despulir la otra cara, lo que tendría por resultado provocar una concavidad de varias franjas en la cara elegida a causa de las fuerzas de compresión del abrasivo (efecto Twyman). Para el caso más general en que es necesario un retoque, puede elegirse entre dos técnicas:

a) Recortar primero el espejo en su forma definitiva y retocarlo luego montado en "bloque", es decir, fijado con brea sobre un plato y rodeado con otros trozos laterales, para obtener un contorno aproximadamente circular (figura 52A). Inconveniente: al despegarlo, inevitablemente se liberan compresiones que por lo común hacen necesario el retoque final del vidrio solo, y este retoque, efectuado sobre una pieza que no es de revolución, resulta muy difícil.

b) Recortar sumariamente un espejo circular bastante más grande que el eje mayor del plano deseado, por ejemplo 100 mm para un plano de 40 a 50 mm de eje menor. Si la pieza a retocar es una lámina de filtro de 150 mm, se la puede volver a trabajar tal cual está (figura 52B). Retocar la superficie de este vidrio hasta volverlo exactamente plano y luego recortar definitivamente el espejo en su forma final. Inconveniente: si el material posee notables residuos de temple (cristal), pueden liberarse tensiones y provocar un defecto imprevisto en el recortado.

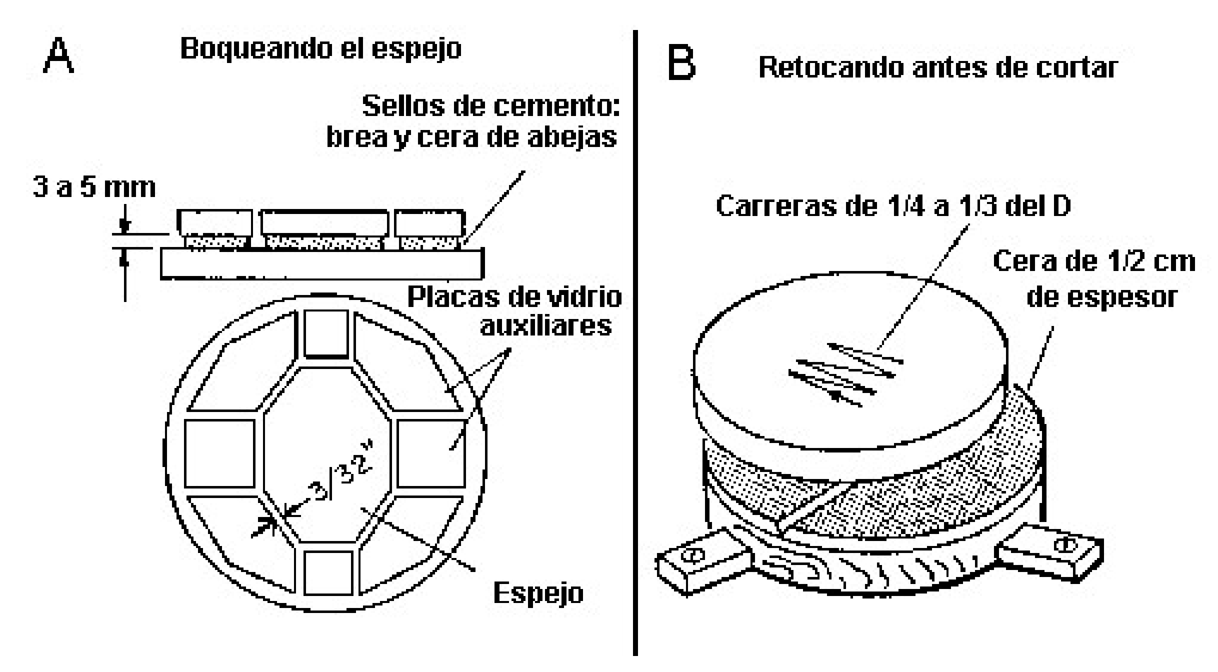


Fig. 52. Dos métodos para mejorar la figura superficial de un espejo plano.

Preferimos no obstante, este segundo método, puesto que con los vidrios delgados considerados aquí, el efecto debido a las tensiones eventuales es generalmente mucho menor que el debido a las tensiones del pegado; además con el recorte se eliminan los bordes de la pieza inicial, que casi siempre son defectuosos.

Para reanudar el pulido de un plano de 10 a 15 cm de diámetro, puede utilizarse una torta de brea no cuadriculada, pero con un diámetro un poco mayor que el del vidrio (1 cm para 10 cm). Como herramienta puede utilizarse un disco metálico, de vidrio o de madera parafinada de caras planas, rodeado con una hoja de papel fuerte que sobresalga en su contorno y bien nivelado para recibir una capa de brea de 5 mm aproximadamente de espesor. La brea debe ser bastante dura; la uña no la marca sino débilmente. Antes del enfriamiento completo se procede a un prensado sobre papel contra una superficie bastante grande; luego a un prensado con rojo. Durante el trabajo la herramienta será desguarnecida por una ranura diametral y en caso de necesidad por pequeños golpes de raspador cruzados, para aumentar su adherencia. Recordamos que una aclimatación a 20º C por lo menos y un trabajo prolongado sin interrupción son indispensables.

Al principio se trabaja con el vidrio arriba y carreras variadas como con un espejo común. La mayor parte de las instrucciones dadas al respecto podrán ser trasladadas aquí. La amplitud de las carreras no debe exceder 1/3 D. La tendencia a producir una superficie cóncava es contrarrestada por el exceso de diámetro de la herramienta, pero si el vidrio es cóncavo desde el principio, se trabajará momentáneamente con la torta arriba, apoyando el vidrio sobre varias capas de muletón.

El borde rebajado eventual, aunque sea muy pronunciado, no es para tomarlo en consideración, puesto que desaparecerá con los fragmentos del recortado. Los graves defectos astigmáticos irregulares del cristal de Saint Gobain, se eliminan en forma automática por un trabajo suficientemente prolongado; con frecuencia bastan 3 ó 4 horas de trabajo. No quedará más que la curva de conjunto y los defectos zonales a rebajar a menos de un décimo de interfranja en la porción central útil, que puede ser delimitada por un diafragma de cartón colocado sobre el vidrio durante el control.

Recorte de los espejos planos

Es mucho más fácil y expeditivo hacer un recorte recto. Para cortar un vidrio algo grueso se utiliza con preferencia un gran corta vidrio de rueda con rodamientos montado como un cepillo de carpintero; en efecto es necesario apoyarse fuertemente para hacer una raya gruesa. El vidrio se coloca sobre un soporte de planicidad verificada. Si uno se guía con una regla, es prudente sujetarla con prensas y hay que tener en cuenta desde luego, el semiespesor del corta vidrio. Para separar el vidrio correctamente se procede de la siguiente manera (figura 53): se coloca el espejo con la cara rayada hacia abajo sobre un paño de billar grande como él, colocando el conjunto sobre una superficie plana bastante masiva (un mármol de mecánico es ideal); exactamente frente al trazo se apoya el separador, que es una especie de herramienta de acero terminada por una superficie cilíndrica de radio corto

(figura 53). Para producir la ruptura por flexión se golpea la cola del separador con un golpe seco dado con un martillo pequeño. Es preferible separar el vidrio en fragmentos de longitud aproximadamente iguales. Cuando se tallan varios espejos en el mismo disco, es necesario comenzar por un corte diametral. La forma más fácil de recortar es sin duda, un rectángulo (figura 53). Para eliminar las pequeñas asperezas y las aristas cortantes se biselarán los bordes frotando la pieza, presentada a 45º con referencia a un trozo de vidrio, con interposición de carborundum 280. Para evitar las rayaduras sobre la capa óptica, puede untársela con resina o gomalaca.

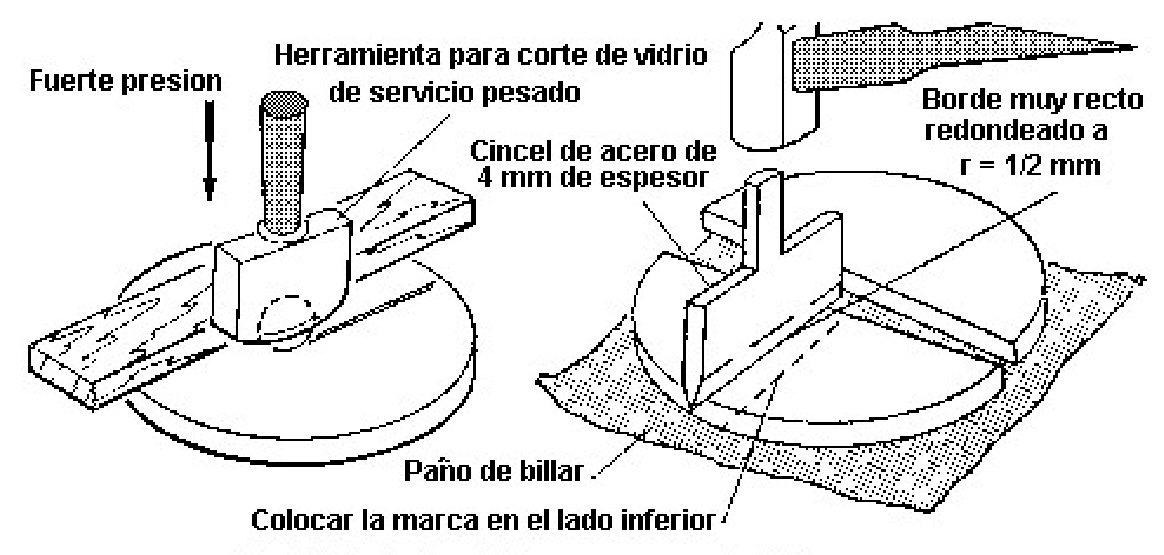


Fig. 53. Cortando vidrio grueso para darle forma

Los espejos octogonales podrán requerir un trabajo de rebordeado un poco más laborioso puesto que los ángulos no siempre se separan tan perfectamente. Si se posee un lapidario de eje vertical o cualquier elemento de máquina que permita improvisar uno, este trabajo no ofrece ninguna dificultad.

Para conseguirse la forma elíptica oblicua, puede desbastarse el vidrio, pegado entre otros dos de protección sobre una piedra esmeril rotativa (lapidario) o una platina, mediante una pieza cilíndrica recortada a 45º sobre la cual debe estar fijado sólidamente con cemento de óptica o pegante epóxico; el alisado se realiza luego en un torno con una placa de hierro montada en el portaherramientas (figura 54A). El recortado con el *Biscuit cutter* puede hacerse con un simple taladro de pie. El *biscuit cutter* es un tubo de metal blando (latón, acero dulce) que sirve también para agujerear o realizar los espejos Cassegrain; su diámetro interior debe tener aproximadamente 2 mm más que el eje menor del espejo a recortar y su espesor es del orden del milímetro; la parte superior posee una pieza de apoyo o cono Morse que se monta sobre el taladro de pie; la sección recta inferior está provista de ranuras que permiten la circulación del abrasivo. Para evitar las escamaduras, el vidrio debe estar pegado con resina (tres cuartas partes de resina y una de cera de abejas) entre dos vidrios de protección.

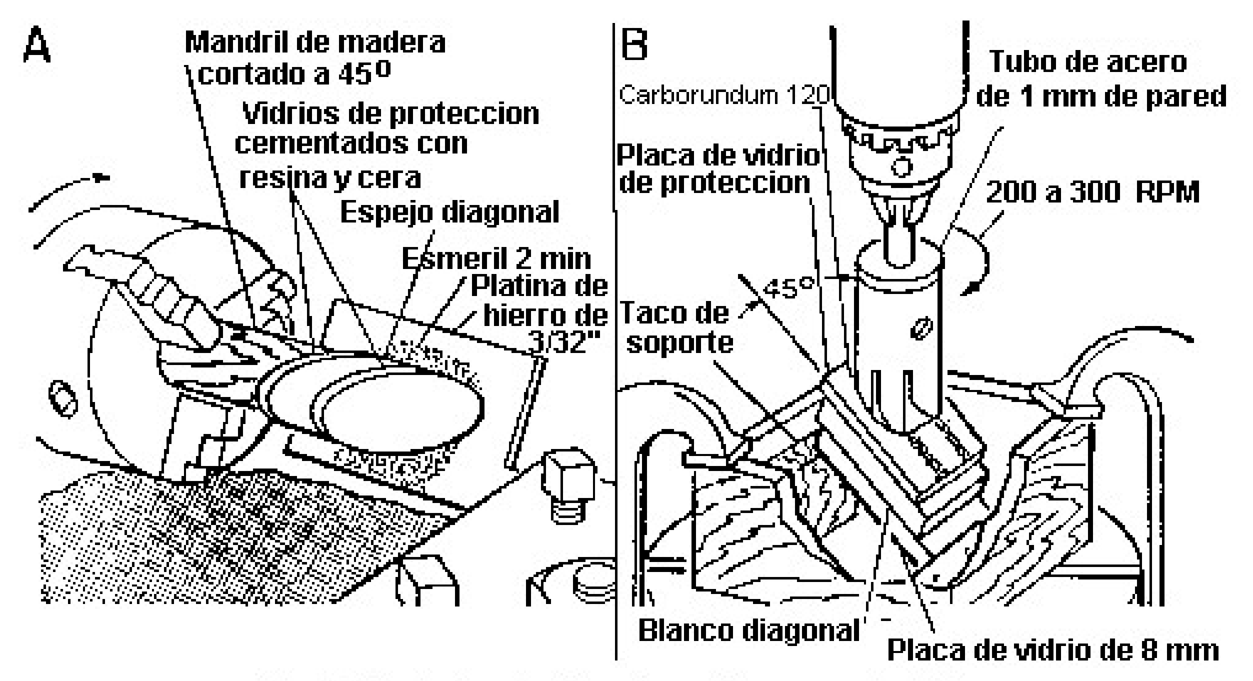


Fig. 54. Produciendo el contorno de un espejo eliptico

Para evitar el comienzo oblicuo del corte del *biscuit cutter* puede colocarse todo a 45º dentro de un cubo lleno de yeso. Un procedimiento sencillo consiste en poner el cristal a 45º dentro de una caja de madera parafinada, que recibe también el agua y el abrasivo (figura 54B) y debe estar sólidamente sujeta sobre el plano del taladro de pie. Es preciso suministrar abundante agua y carborundum 120 por ejemplo, y sacar a menudo el *biscuit cutter* del corte para asegurar un buen trabajo de abrasión sin calentamiento exagerado. El carborundum es evidentemente, un vecino peligroso para la máquina que debe tocarse únicamente con la mano que no maneja el abrasivo y protegerla todo lo posible con trozos de tela encerada. Luego del corte y despegue del espejo, se hace un pequeño bisel, porque la arista aguda se escama fácilmente.

Retoques finales

El control después del recorte no está exento de sorpresas; en el caso de un espejo elíptico lo menos que puede esperarse es una ligera elevación del borde agudo debido al efecto Twyman del canto inclinado. Esta anomalía es suficientemente pequeña y localizada y puede despreciarse. Si alcanza 2/10 de franja, se podrá proceder a un retoque a dedo. La liberación de tensiones, en ciertos casos necesita una intervención más seria que un simple retoque parcial. Si el defecto alcanza o excede una franja, lo que felizmente es muy raro, es preciso recurrir a una torta tan grande como el eje mayor de la elipse; con este procedimiento será de temer el rebajado del borde. Si se quiere un espejo impecable, será más económico recortar uno nuevo de un plano de vidrio óptico con recocido especial.

4. Los oculares

Generalidades sobre los oculares

Comparado con el objetivo, el ocular del instrumento tiene una función mucho más modesta y su fabricación industrial no implica dificultades del mismo orden, de modo que desaparece la principal razón de la construcción por uno mismo. Para el aficionado constructor no hay nada más desagradable que comprobar que la adquisición de una serie de buenos oculares representa uno de los gastos más considerables. Esta cuestión merece pues, cierta atención.

El ocular es una especie de lupa que el ojo utiliza para aprovechar al máximo la imagen primaria dada por el objetivo. De todas maneras, la idea que uno se hace de una lupa vulgar, destinada al examen de objetos no luminosos por sí mismos, necesita ser completada aquí por indicaciones importantes. No olvidemos que el radio de la mancha de difracción de un objetivo f/6 tiene apenas más de 4 μm y que hemos tomado en consideración para nuestro boletín de control apartamientos transversales del orden del micrón; lógicamente nuestra “lupa” debe poder dar una representación correcta de objetos de esta dimensión. Anotemos también que la observación de un objeto muy brillante sobre fondo negro, es particularmente reveladora (los microscopistas lo saben bien) de los defectos de la óptica empleada.

Para emitir un juicio comparativo sobre los tipos de oculares, no solamente es necesario disponer de un objetivo irreprochable y de un ojo normal, sino también especificar el papel que juegan las propiedades fuera del eje del objetivo y especialmente no olvidar mencionar la abertura del haz y el diámetro pupilar instrumental. Según los valores de estos dos parámetros los defectos de los tres elementos presentes: objetivo, ocular y ojo tendrán un papel relativo más o menos importante. Por ejemplo, si asociamos un objetivo f/15 con un ocular bastante fuerte para dar una pupila de salida que no exceda de 6/10 de mm, podremos juzgar el valor del objetivo sin inquietarnos por los defectos del ocular ni por los del ojo. Con un objetivo f/6 y una pupila de menos de 6/10 de mm los defectos del ojo no son siempre molestos, pero pueden serlo los del ocular; debe emplearse un ocular bien corregido.

Siempre con nuestro espejo f/6, para interpretar la calidad de la imagen obtenida con poco aumento, dando una pupila de aproximadamente 6 mm, es necesario pensar no solamente en los defectos del ocular sino también en los del ojo, que desempeñan esta vez una función más importante que las pequeñas aberraciones residuales sobre el eje dadas por el objetivo. Finalmente en éste último caso (haz f/6 y pupila de 6 mm), el apreciar la calidad de las imágenes en el borde del campo no tiene casi sentido por así decirlo, puesto que los defectos del ojo intervienen de manera variable, prácticamente impredecible; en el mejor de los casos, el anillo ocular coincide con la pupila del ojo y este último, para observar un objeto en el borde del campo, gira dentro de su órbita alrededor de un centro

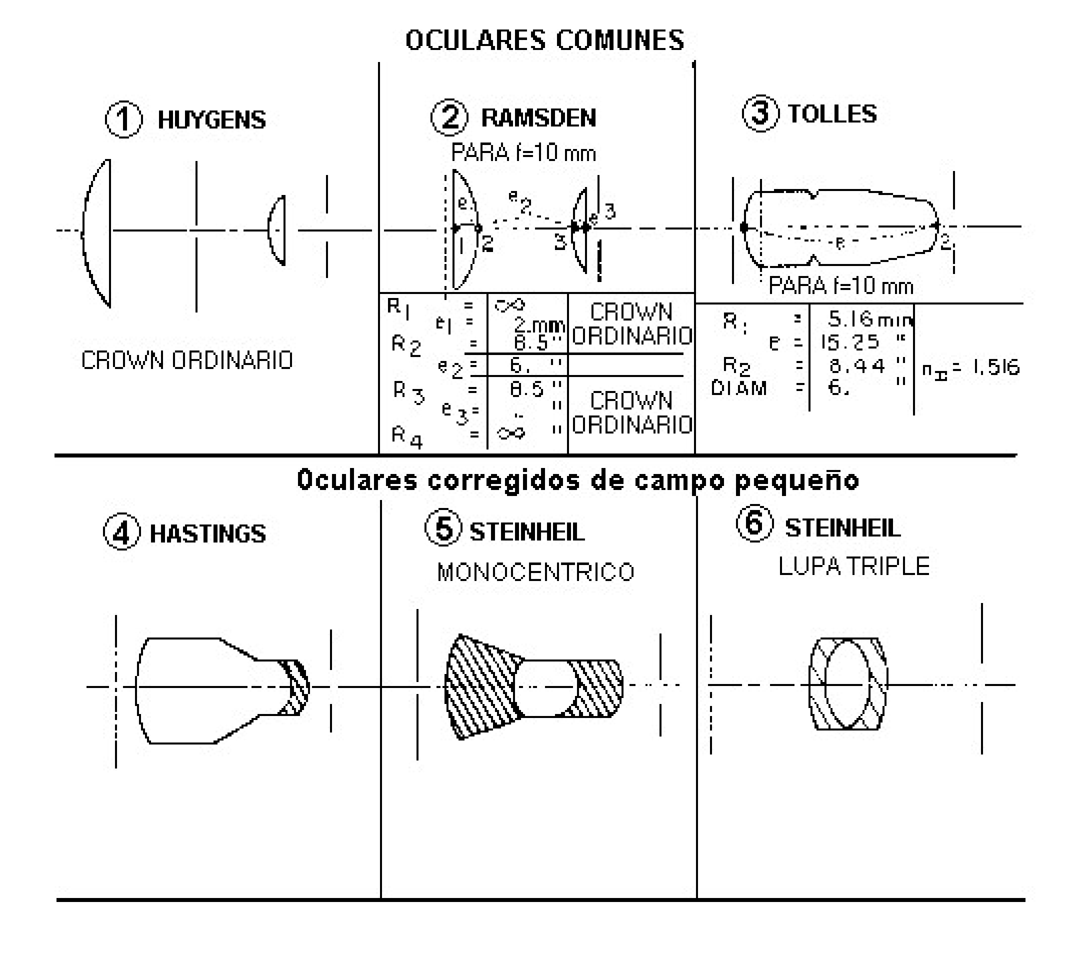
colocado notablemente más atrás. De aquí resulta un diafragmado en ojo de gato, disimétrico con relación a la región axial de la córnea, única que posee una calidad óptica satisfactoria.

No insistiremos, pero esto basta para comprender el valor muy relativo de los datos que damos más adelante, obtenidos con gran número de oculares de distinta fabricación, que no siempre aprovechan las posibilidades de la fórmula respectiva a causa de imperfecciones de ejecución.

La cuestión de los oculares es importante, difícil, y no ha encontrado una respuesta satisfactoria para todos los casos.

Los principales tipos de oculares

La figura 55 indica las proporciones, con dimensiones a escala, de los diferentes tipos de oculares de aproximadamente 17 mm de longitud focal (excepto los oculares de gran campo que no están a escala). El sentido de la marcha de la luz es de izquierda a derecha y están marcados los planos principales: del lado *foco objeto* por el punteado grueso que indica el plano del diafragma de campo y del lado *foco imagen* por la pupila de salida o anillo ocular que en lo posible debe coincidir con la pupila del ojo; el diafragma exterior del ocular debe entonces encontrarse 7 u 8 mm más cerca del lente de ojo, lo que no es posible sino con ciertos tipos de oculares no muy fuertes.



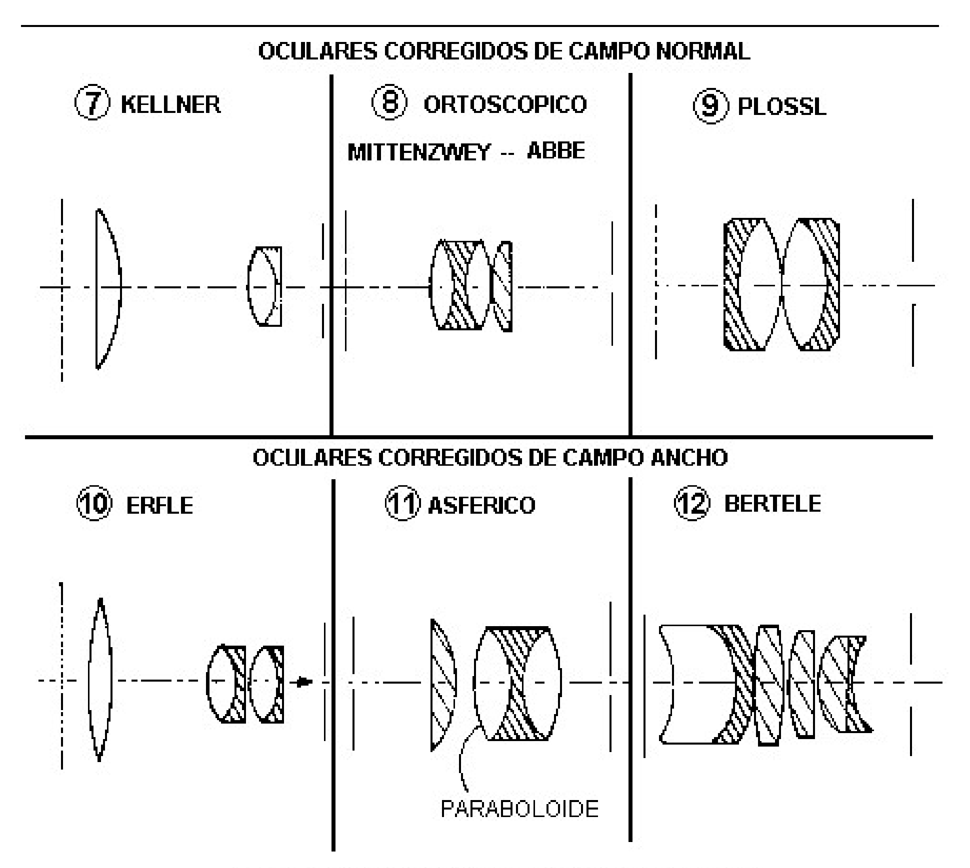


Fig. 55. Principales tipos de oculares

Ocular de Huygens

La combinación se enuncia: 4 – 3 – 2 (Huygens) ó 3 – 2 – 1 (Dollond). Estas cifras corresponden respectivamente a la distancia focal del lente de campo, a la separación de ambos lentes y a la distancia focal del lente de ojo. La longitud focal resultante vale 8/3 en el primer caso y 3/2 en el segundo. Con estas proporciones se logra el acromatismo de aumento. El diafragma de campo está comúnmente abierto a 45º. Los reflejos son extensos pero pálidos, y por lo tanto no molestan. El mayor defecto del sistema es una fuerte aberración esférica que se torna desastrosa con la abertura f/8 ó f/6 de nuestros telescopios. A f/6, con una pupila de salida de 3 mm, los resultados son francamente lamentables; el menor desplazamiento del ojo con respecto al eje produce penachos intolerables. Desgraciadamente, este ocular es el más difundido. Si el presupuesto exige el uso de oculares de este tipo que ya se posean, no debe olvidarse que los resultados menos malos se obtendrán con fuertes aumentos correspondientes a pupilas menores de 1 mm.

Ocular de Ramsden

Símbolo: 1 – 1 – 1; la longitud focal resultante vale también la unidad, pero generalmente se prefiere aproximar un poco los vidrios para evitar la acomodación sobre los defectos y el polvo del lente de campo. En este caso el cromatismo lateral no está totalmente corregido; existe una franja roja interior que bordea las estrellas observadas en el borde del campo, que a su vez se limita corrientemente a 30º. Esta propiedad es algunas veces utilizada para compensar la dispersión atmosférica llevando al astro observado fuera del centro del campo. La aberración esférica es apenas 1/8 de la correspondiente al Huygens y, sin ser perfecto, los resultados con haces a f/6 y especialmente a f/8, son aceptables. La construcción de este ocular es fácil y poco costosa; las características de los lentes figuran en la figura 55 – 2[1]. La figura 56A representa una versión de montura simplificada que no exige torno con dispositivo para roscar. Este es el ocular por excelencia del aficionado poco afortunado, pero no se recomienda para f/6 si la pupila excede 2 mm.

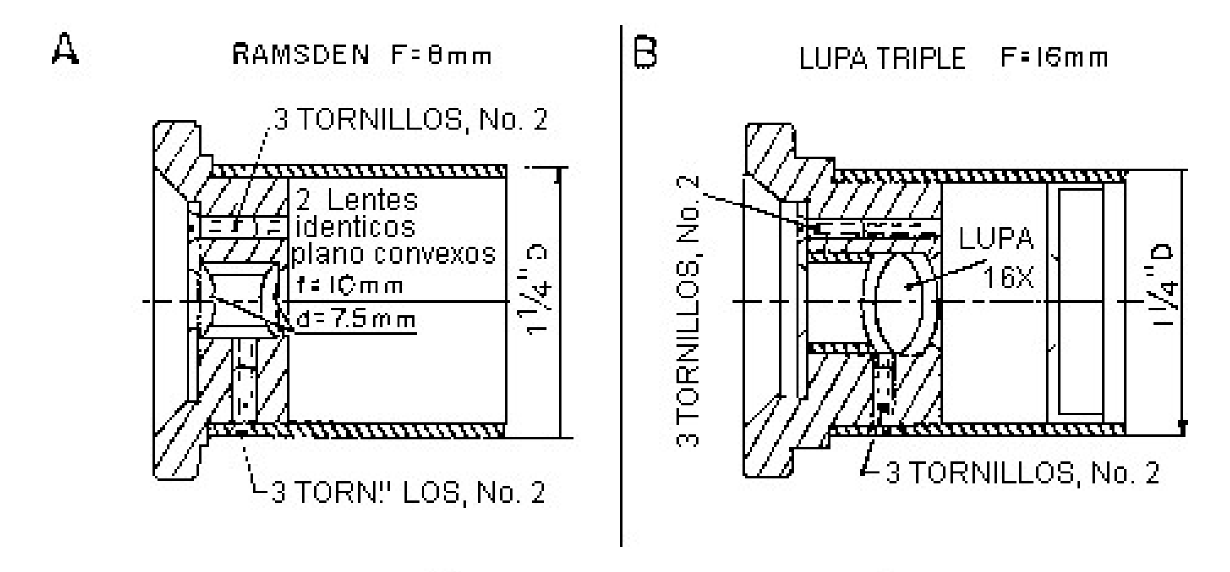


Fig. 56. Monturas para oculares económicos

Ocular de Tolles

Consta únicamente de un lente grueso. Muy superior al Huygens desde el punto de vista de la aberración esférica y de la tolerancia en el centrado del ojo. Es fácil de montar. No presenta ningún reflejo molesto. Su curvatura de campo es enorme, lo cual lo limita prácticamente a 12º, que no lo hace aconsejable para los aparatos con montura azimutal. Tiene radio de curvatura muy corto del lado del ojo (un tercio de la longitud focal) y por lo tanto de difícil construcción en cortas distancias focales, necesarias para los telescopios a f/6.

Ocular de Hastings

Derivado del Tolles; tiene buena corrección cromática y notable curvatura de campo; la distorsión crece rápidamente más allá de los 25º de campo total.

Ocular monocéntrico

Se debe a Steinheil, que dejó numerosas fórmulas. Posee muy buena corrección cromática. La curvatura de campo apenas permite exceder útilmente 25º. Excelente ocular para la observación planetaria, pero no es de empleo práctico a menos que el instrumento esté montado ecuatorialmente.

Lupa triple

Debida a Steinheil. Posee muy buena corrección cromática y poca aberración esférica; con un haz a f/6, las imágenes sobre el eje son perfectas aun con una pupila que alcance a 4 mm. El astigmatismo y la curvatura de campo no incomodan sino para un campo de más de 30º. Ningún reflejo visible. Los planos principales están muy alejados de los lentes. Es el mejor de los oculares y no tiene sino dos superficies aire vidrio. Observemos que esta fórmula es utilizada a menudo para hacer lupas de buena calidad, frecuentemente calificadas como aplanéticas, es decir que no producen distorsión y pueden adquirirse a precios relativamente ventajosos. El foco de una lupa es igual, en principio al cociente de 250 mm por el aumento indicado en la montura. Siempre debe verificarse antes de su compra y hay que sacar el lente de la montura para asegurarse de la presencia del lente pegado que está en el medio, característica de la lupa de Steinheil; muchos artículos, exteriormente similares, están constituidos por lentes simples separados. La figura 56B indica un ejemplo de montaje de una lupa de aproximadamente 16 mm de longitud focal.

Ocular de Kellner

Tiene muy buena corrección acromática, y las imágenes son perfectas sobre el eje con un haz a f/6 y pupila de 3 mm. Posee un notable astigmatismo y curvatura de campo. No obstante esto, la abertura de campo es llevada generalmente a más de 40º. Son empleados comúnmente en los binóculos a prismas y anteojos de campaña y en el mercado de ocasión pueden hallarse a buen precio los de foco de 16 a 24 mm. Existen muchas variantes, pero están todas afectadas por un pequeño reflejo muy brillante, a menudo molesto.

Ocular ortoscópico

Uno de los más importantes en astronomía y de los mejor corregidos, al menos teóricamente. Los que hemos podido ensayar, de cuatro marcas diferentes, están bien corregidos sobre el eje, pero dejan ver, en el borde de un campo de 40 a 45º un astigmatismo y una curvatura de campo notables, tanto con un haz a f/20 como con uno a f/6 y esto para pupilas comprendidas entre 1 y 4 mm. Los peores muestran una coma y un sensible cromatismo irregular que no puede ser atribuido sino a un defecto de construcción.

Los numerosos reflejos de este ocular son grandes y pálidos y prácticamente jamás resultan perjudiciales. Los planos principales están muy alejados de los lentes. Este es el tipo de ocular a emplear con nuestros telescopios abiertos a f/8 y f/6 y ciertos constructores los fabrican en series muy extensas. Nosotros hemos calculado una serie especial para el telescopio estándar, muy bien corregidos de la irregularidad cromática mencionada más arriba.

Ocular de Plössl

Es poco conocido por los astrónomos; el que hemos podido probar, que tiene 30 mm de foco[2], nos fue prestado por Paul McCartney y es el mejor ocular que conocemos. La corrección sobre el haz es perfecta con un haz a f/6 y una pupila de 4 mm. El astigmatismo y la curvatura de campo son prácticamente nulas en un campo de 50º para haces que no excedan f/6; el cromatismo lateral está igualmente mucho mejor corregido que en los oculares ortoscópicos que se encuentran actualmente en el mercado. Tiene un pequeño reflejo, mucho más pálido que el de los Kellner pero más visible que el del ortoscópico. Este ocular es más fácil de fabricar comercialmente que el ortoscópico, puesto que no tiene lente con doble pegado, y los radios y espesores son un poco mayores, lo que facilita mucho la construcción en focos muy cortos. Se puede conseguir en Francia[3], en series que se adaptan particularmente a nuestro telescopio estándar, en longitudes focales de 75, 55, 40, 25, 12, 8, 6, 4 y 3 mm. El tratamiento “antirreflejo” de las cuatro superficies aire cristal, elimina sustancialmente los reflejos antes mencionados.

Oculares de gran campo

No les mencionaremos más que a título informativo y su empleo no está previsto en el telescopio estándar. Solamente para ciertas investigaciones con telescopio de campo extenso (R. F. T. Rich Field Telescope) provistos de aumento equipupilar (6 a 7 mm de pupila) y generalmente muy abiertos (f/4 ó f/5) es necesario un ocular de gran campo, muy bien corregido, que la complicación inevitable de la combinación puede pagar. Para la dimensión del campo máximo interesante, las opiniones están divididas; un campo de más de 60º impone al ojo, que debe examinar un detalle en el borde, una gimnasia poco común, pero es el observador quien debe decidir. Es suficiente que un buscador de cometas vea, aun imperfectamente y sin nitidez, una débil luminosidad, para que inmediatamente la lleve al centro del campo.

Ocular de Erfle

Se deriva del Kellner, y tiene el lente de ojo desdoblado; en las mejores variantes, el astigmatismo es ya muy importante en el borde de un campo de 65º.

Ocular con lente asférico

La deformación de una superficie, da posibilidades extraordinarias para la corrección de la distorsión y del astigmatismo, que no son más pronunciadas en un campo aparente enorme de 90º que con un ocular de Erfle en un campo de 60º. La fabricación industrial es extremadamente difícil y poco satisfactoria, a causa de la muy grande deformación de la superficie correctora.

Ocular de Bertele

Se logra un campo de 80º solamente con caras esféricas, pero el espesor del vidrio de campo es comparable a la longitud focal del conjunto y las ocho superficies aire vidrio exigen un eficaz tratamiento antirreflejo para toda aplicación astronómica. Paul, refiriéndose a este ocular, menciona la interesante posibilidad de corregir la coma, que es muy importante en los espejos muy abiertos (f/4) a partir de 1º del eje.

Elección de una serie de oculares

El cuadro siguiente indica los principales aumentos que resultan útiles para aplicar al telescopio estándar de 20 cm. Por lo general una serie de aumentos regularmente escalonados entre ambos límites extremos, es un lujo costoso e inútil, excepto alrededor del valor óptimo aplicable con buenas condiciones de observación de superficies planetarias, valor que es un poco superior a una vez por milímetro de diámetro del objetivo (pupilas de 0,8 a 0,9 mm). Cuando el presupuesto no permite obtener de una vez una serie bien nutrida, es necesario procurarse primero el ocular débil (pupila 3 a 6 mm) y el ocular normal (pupila de 0,8 mm más o menos); inmediatamente después se comprarán el ocular muy fuerte (pupila inferior a 0,5 mm más o menos) y según la especialidad elegida, los oculares complementarios para los aumentos de trabajo sobre los planetas (pupilas de 0,65 mm a 1 mm) o sobre estrellas variables (pupilas de 1 a 2 mm). Los oculares indicados forman parte de series realmente fabricadas y existentes, especialmente la de Manent, para corredera de 27 mm de diámetro, y de una nueva serie de ortoscópicos que hemos vuelto a calcular especialmente para los usuarios del telescopio estándar fabricados con las máximas condiciones de economía. El diámetro adoptado para la corredera es también de 27 mm, como el de la montura estándar.

<table>
<tr><th rowspan="2">Aumento</th><th rowspan="2">Pupilas en mm</th><th colspan="2">Longitudes focales con espejo de 200 mm</th><th rowspan="2">Observaciones y uso</th></tr>
<tr><th>f / 6</th><th>f / 8</th></tr>
<tr><td>48</td><td>4,2</td><td>25 Kellner, Ortoscópico o Plössl</td><td></td><td rowspan="2">Campo más grande que la luna. Luz cenicienta. Eclipses Nebulosas.</td></tr>
<tr><td>64</td><td>3,1</td><td></td><td>25 Kellner, Ortoscópico o Plössl</td></tr>
<tr><td>100</td><td>2</td><td>12 Lupa triple, Ortoscópico o Plössl</td><td>16 Kellner, Lupa triple, Ortoscópico o Plössl</td><td rowspan="2">Comparaciones, Estrellas variables</td></tr>
<tr><td>150</td><td>1,3</td><td>8 Ortoscópico</td><td></td></tr>
<tr><td>200</td><td>1</td><td>6 Ortoscópico o Plössl</td><td>8 Ramsden, Ortoscópico o Plössl</td><td rowspan="4">Oculares de trabajo, normalmente suficientes para explotar al máximo el</td></tr>
<tr><td>240</td><td>0,83</td><td rowspan="2">5 igual a arriba</td><td rowspan="2">6 igual a arriba</td></tr>
<tr><td>267</td><td>0,75</td></tr>
<tr><td>300</td><td>0,67</td><td>4 igual a</td><td>5 igual a</td></tr>
</table>

<table>
<tr><th rowspan="2">Aumento</th><th rowspan="2">Pupilas en mm</th><th colspan="2">Longitudes focales con espejo de 200 mm</th><th rowspan="2">Observaciones y uso</th></tr>
<tr><th>f / 6</th><th>f / 8</th></tr>
<tr><td>48</td><td>4,2</td><td>25 Kellner, Ortoscópico o Plössl</td><td></td><td rowspan="2">instrumento sobre las superficies planetarias</td></tr>
<tr><td>203</td><td>0,63</td><td>arriba</td><td>arriba</td></tr>
<tr><td>400</td><td>0,5</td><td>3 igual a arriba</td><td>4 igual a arriba</td><td rowspan="2">Mancha de difracción bien visible. Estrellas dobles. Centrado exacto.</td></tr>
<tr><td>533</td><td>0,38</td><td></td><td>3 igual a arriba</td></tr>
</table>

[1] La longitud focal del ejemplo dado es de 8,4 mm y no 10 mm como se indica en la figura.

[2] El ocular del telescopio "Simplex" de la marca Konus, tiene un Plössl de 17 mm.

[3] Casa Clavé, 9 rue Olivier Métra, París, XX.

5. Parte mecánica del telescopio

Generalidades

La elección del montaje para el telescopio estándar destinada a obtener la mayor difusión posible, está dictada especialmente por consideraciones de economía, de simplicidad y de facilidad de construcción. Se ha adoptado el modelo concebido y realizado por André Couder, descrito en *Lunettes et télescopes*, pág. 322, que ofrece todas estas ventajas sin sacrificar la corrección del montaje. Partiendo de la idea de que un telescopio sirve ante todo para hacer observaciones astronómicas, toda complicación surgida exclusivamente por razones estéticas, que no persiga una mejora interesante para el observador, ha sido excluida.

Los planos dados en las figuras 57, 58 y 59 (que no difieren del modelo original sino en detalles) son evidentemente, susceptibles de una interpretación amplia, excepto en cuanto tenga relación con las características reales de las piezas ópticas que se posean efectivamente. En modo especial está sujeto a revisión el emplazamiento del portaocular y uno debe elegir el lado de la tabla a perforar (derecha o izquierda), según se desee disponer de un buscador recto para el ojo izquierdo o para el ojo derecho.

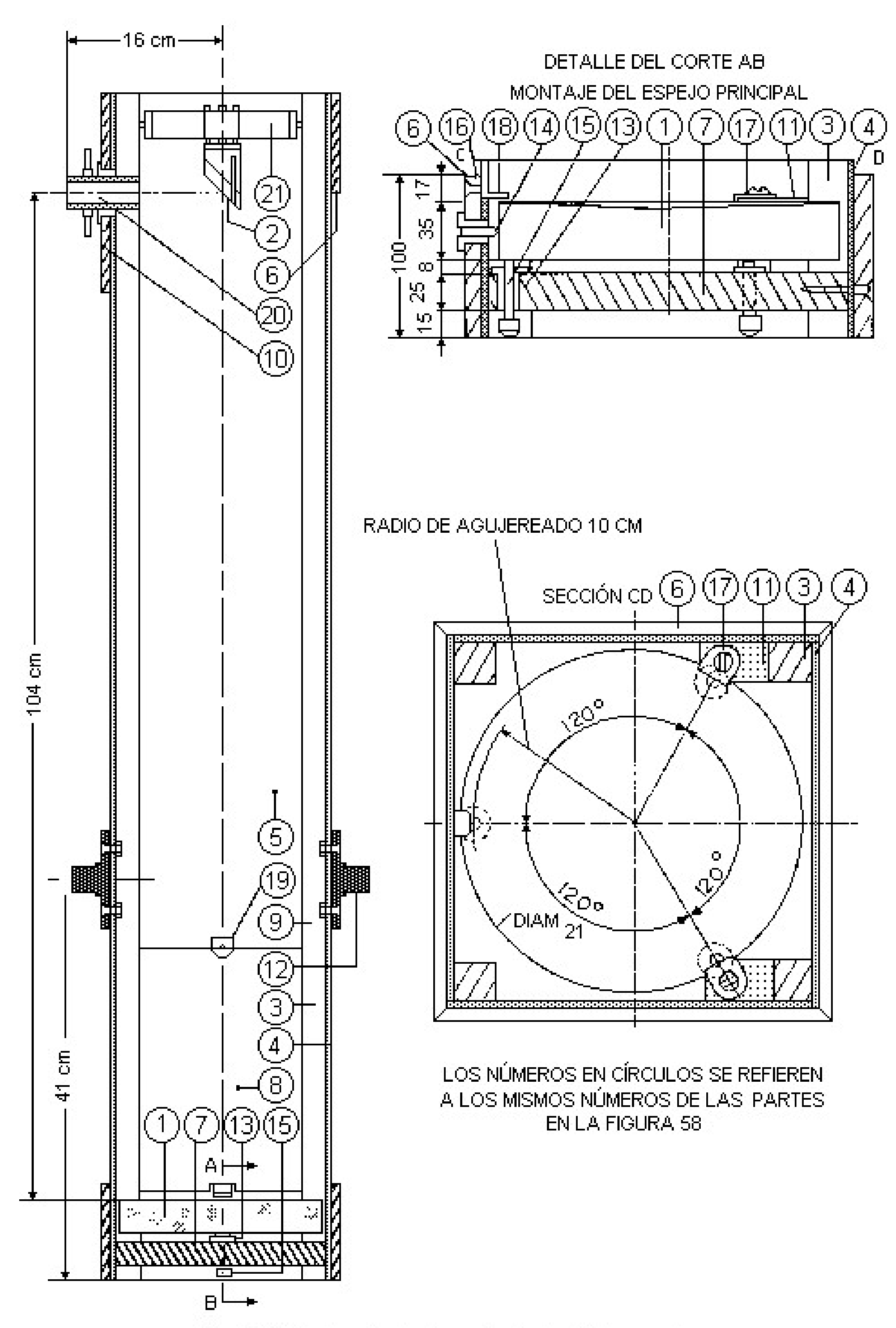
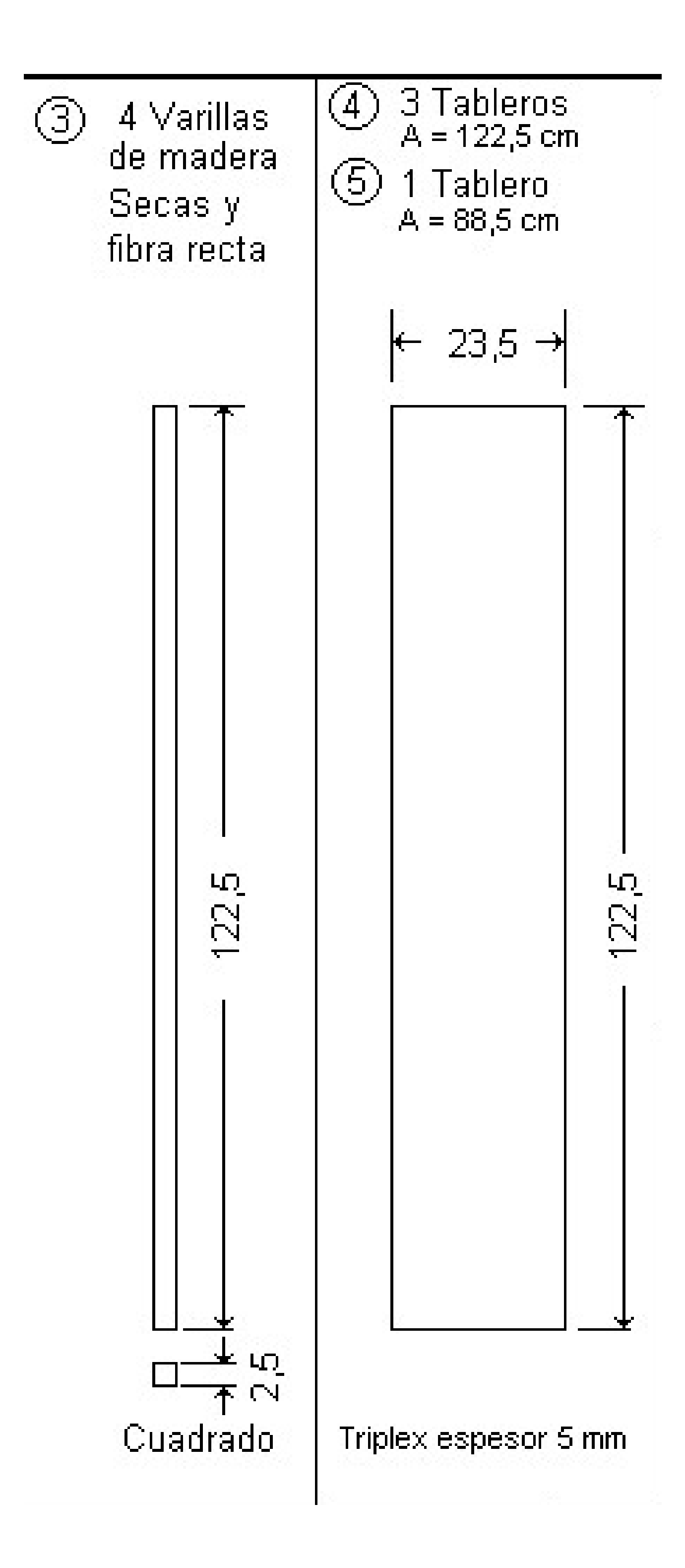
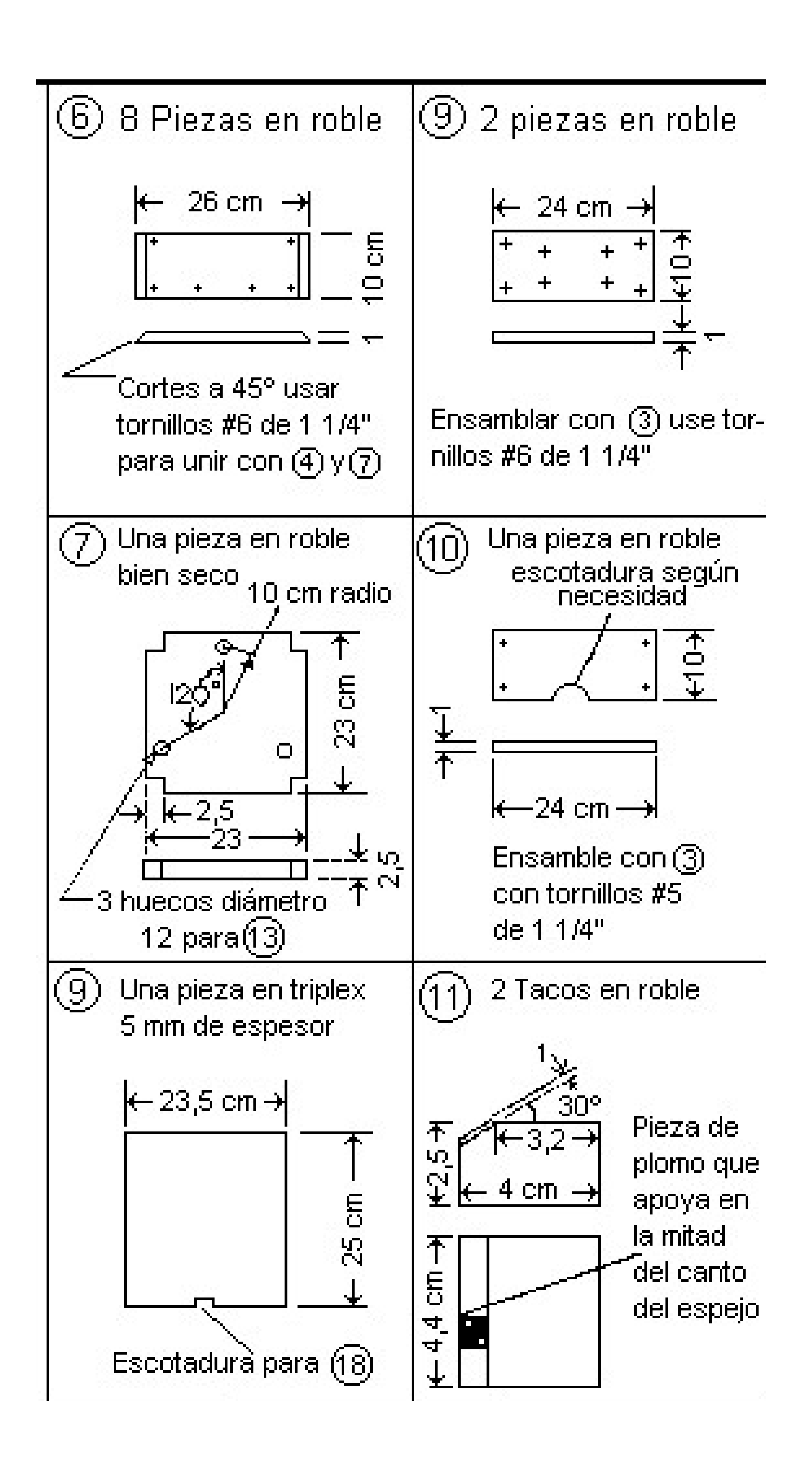


Fig 57. Conjunto del montaje del telescopio

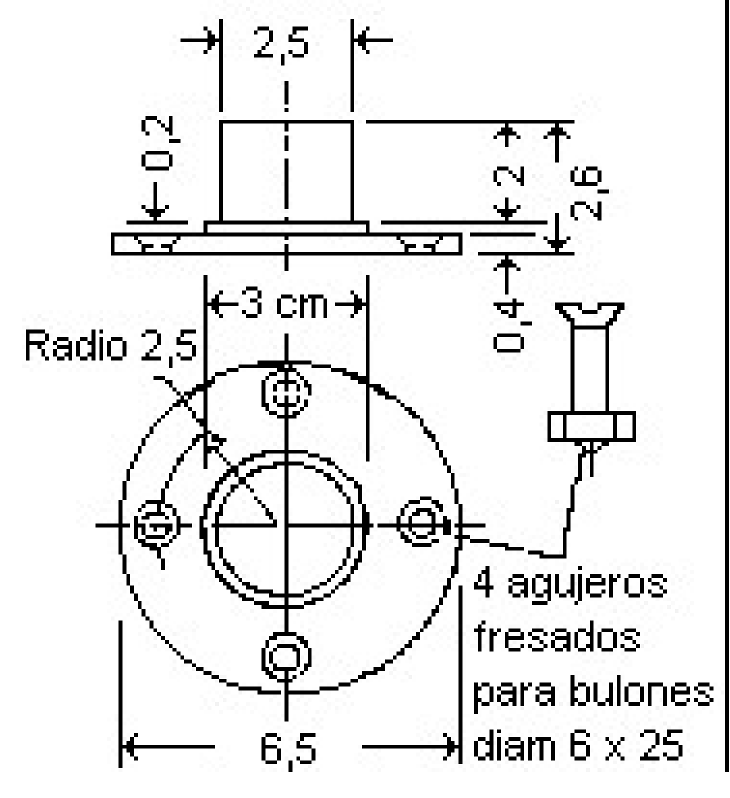


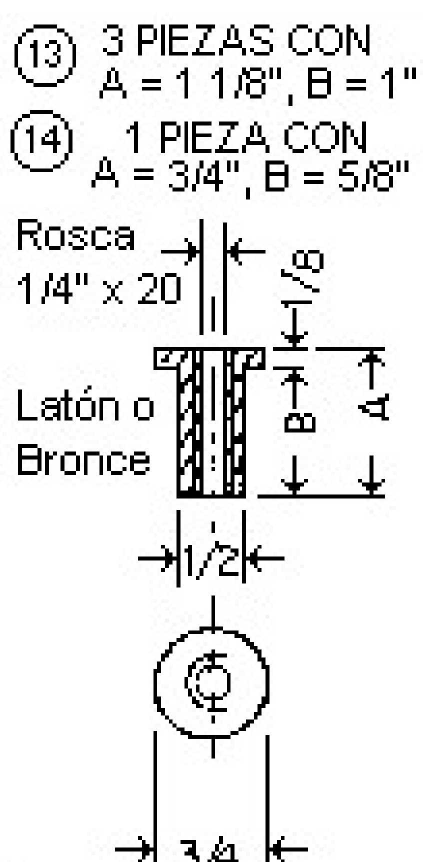
3
4 Varillas
de madera
Secas y
fibra recta
4
3 Tableros
A = 122,5 cm
5
1 Tablero
A = 88,5 cm
23,5
122,5
122,5
2,5
Cuadrado
Triplex espesor 5 mm

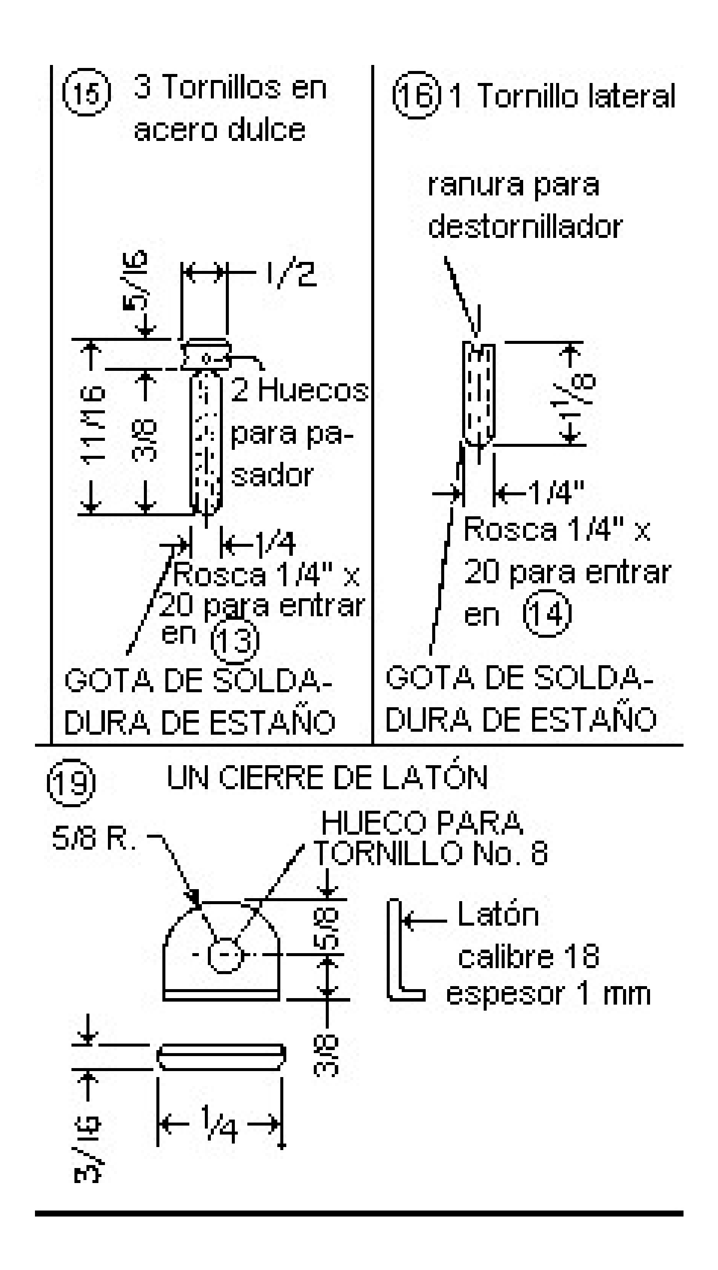


6 8 Piezas en roble
26 cm
10 cm
1
Cortes a 45° usar tornillos #6 de 1 1/4" para unir con 4 y 7
9 2 piezas en roble
24 cm
10
1
Ensamblar con 3 use tornillos #6 de 1 1/4"
7 Una pieza en roble bien seco
10 cm radio
120°
23 cm
2,5
23
2,5
3 huecos diámetro 12 para 13
10 Una pieza en roble
escotadura según necesidad
10
1
24 cm
Ensamble con 3 con tornillos #5 de 1 1/4"
9 Una pieza en triplex 5 mm de espesor
23,5 cm
25 cm
Escotadura para 18
11 2 Tacos en roble
1
30°
3,2
2,5
4 cm
4,4 cm
Pieza de plomo que apoya en la mitad del canto del espejo

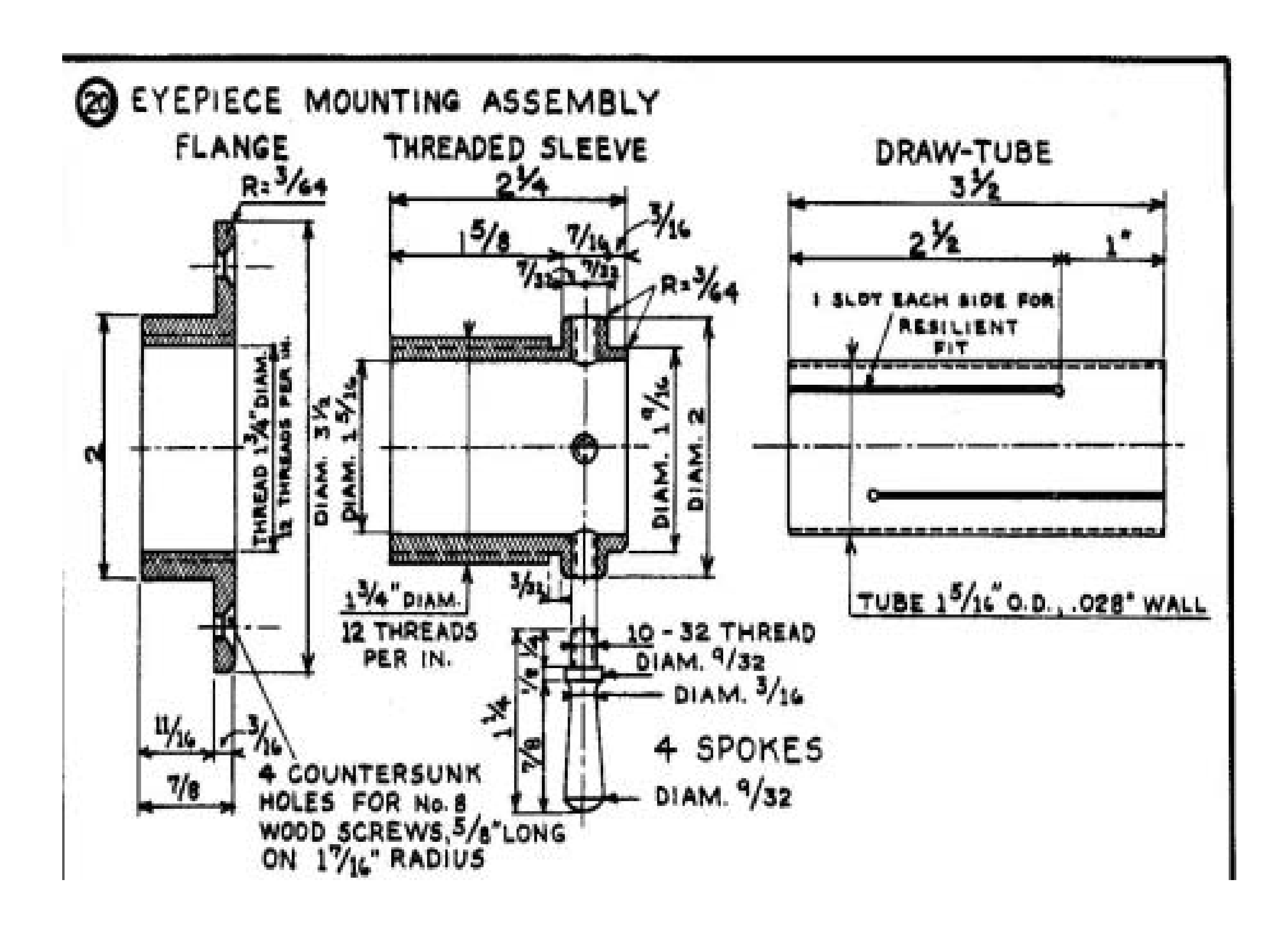

(12) 2 Muñones de acero dulce


2,5
0,2
2
2,6
0,4
3 cm
Radio 2,5
4 agujeros
fresados
para bulones
diam 6 x 25
6,5

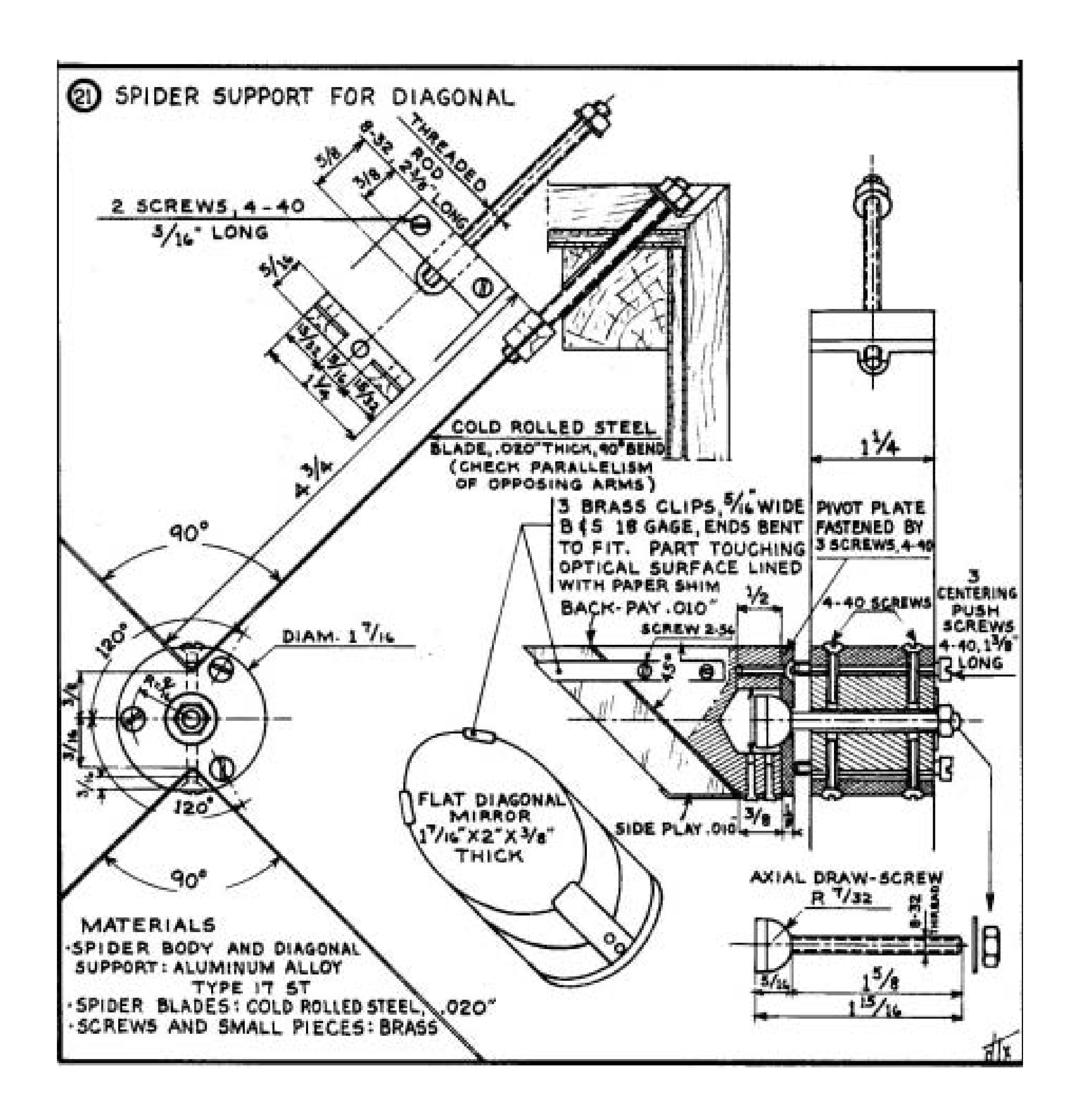

(13) 3 PIEZAS CON
A = 1 1/8", B = 1"
(14) 1 PIEZA CON
A = 3/4", B = 5/8"
Rosca
1/4" x 20
1/8
Latón o
Bronce
B
A
1/2
3/4



Según el material, las herramientas y la experiencia que ya se posea, uno puede alcanzar soluciones más o menos felices. Prevenimos a los inventores que además tengan la intención de observar, que aún los menores detalles de la montura estándar, han sido diseñados después de la experiencia directa; estimamos necesario insistir sobre algunos puntos importantes que sería peligroso abandonar a la iniciativa del “buen sentido mecánico”.



20 EYEPIECE MOUNTING ASSEMBLY
FLANGE
THREADED SLEEVE
DRAW-TUBE
R=3/64
2¼
3½
5/8
7/16
3/16
2½
1"
7/32
7/32
R=3/64
1 SLOT EACH SIDE FOR RESILIENT FIT
2
THREAD 1¾" DIAM. 12 THREADS PER IN.
DIAM. 3½
DIAM. 1 5/16
DIAM. 1 9/16
DIAM. 2
1¾" DIAM.
12 THREADS PER IN.
3/32
TUBE 1 5/16" O.D., .028" WALL
10 - 32 THREAD
DIAM. 9/32
DIAM. 3/16
4 SPOKES
DIAM. 9/32
11/16
3/16
7/8
4 COUNTERSUNK HOLES FOR No. 8 WOOD SCREWS, 5/8" LONG ON 1 7/16" RADIUS



21 SPIDER SUPPORT FOR DIAGONAL
2 SCREWS, 4-40
3/16" LONG
THREADED ROD 8-32 2 3/8" LONG
COLD ROLLED STEEL
BLADE, .020" THICK, 90° BEND
(CHECK PARALLELISM
OF OPPOSING ARMS)
3 BRASS CLIPS, 5/16" WIDE
B & S 18 GAGE, ENDS BENT
TO FIT. PART TOUCHING
OPTICAL SURFACE LINED
WITH PAPER SHIM
PIVOT PLATE
FASTENED BY
3 SCREWS, 4-40
BACK-PAY .010"
SCREW 2-56
4-40 SCREWS
3
CENTERING
PUSH
SCREWS
4-40, 1 3/8"
LONG
DIAM. 1 7/16
90°
120°
FLAT DIAGONAL
MIRROR
1 7/16" X 2" X 3/8"
THICK
SIDE PLAY .010
AXIAL DRAW-SCREW
R 7/32
8-32 THREAD
MATERIALS
·SPIDER BODY AND DIAGONAL
SUPPORT: ALUMINUM ALLOY
TYPE 17 ST
·SPIDER BLADES: COLD ROLLED STEEL, .020"
·SCREWS AND SMALL PIECES: BRASS

Importantes detalles de construcción

Montaje del espejo principal

Es absolutamente necesario evitar toda presión de la montura sobre el vidrio que, no obstante debe ocupar, con relación a ella, una posición bien definida y ajustable. En el caso de un espejo de 20 cm no existe ninguna dificultad; es precisamente por esto que tememos las reacciones de los espíritus inquietos y complicados. El espejo apoya permanentemente sobre cinco puntos elegidos a saber: (figura 57) el dorso, sobre las extremidades guarnecidas de estaño de los tres tornillos calantes (ref. 15) dispuestos en los vértices de un triángulo equilátero exactamente inscrito en el contorno del vidrio. El borde apoya sobre bloques laterales (ref. 11) a 120º. El dispositivo de seguridad comprende un tornillo lateral (ref. 16) y las patas de seguridad (ref. 17 y 18) que no deben tocar el vidrio cuando el espejo está en posición de trabajo; un juego lateral de 0,5 mm y axial de 2 mm debe considerarse como normal. Antes de observar, debemos asegurarnos que un choque o una inversión anormal del tubo no separen el espejo de uno de los 5 contactos necesarios para volver a tener el instrumento en orden.

Mencionemos especialmente los errores más graves y frecuentes que es necesario evitar a toda costa:

1. Pegar el espejo sobre otro disco llamado de “refuerzo”, de vidrio o metal. Resultado: destrucción total de la imagen de difracción por el efecto catastrófico de las tensiones mecánicas recíprocas.

2. Montar el espejo en una celda metálica “de precisión” ajustada por alisado al torno; las contracciones que semejante montura pueden ejercer sobre el vidrio cuando la temperatura es muy poco menor a la existente durante el ajuste, deforman el espejo por calentamiento y constituyen un peligro de fractura.

3. Apoyar el espejo directamente sobre un disco metálico preparado al torno; en la escala de deformaciones que nos interesan (1/10 de μm), el contacto dorsal, no obstante las apariencias, no tiene contacto sino en tres puntos como máximo, que son desgraciadamente cualquiera esta vez. Supongamos por ejemplo, una celda convexa a 1/100 de mm; si se apoya el espejo sobre esta elevación, puede estarse seguro de tener una elevación correspondiente sobre la superficie de onda; existirá una sobre corrección esférica y el eje óptico será inestable. Si la celda es cóncava, es bastante difícil que los tres puntos de la corona sobre la que apoyará el espejo estén igualmente espaciados y se tendrá astigmatismo.

4. Interponer entre el fondo torneado de la celda metálica y el espejo un anillo o disco de franela es una solución más correcta, pero inferior a la de contactos geométricos a causa de la inestabilidad del eje óptico y del obstáculo al intercambio térmico por la cara dorsal del espejo.

Para ser correcta, una celda mecánica debe ser relativamente liviana (paredes delgadas y nervaduras), completamente cerrada o provista de puertas de ventilación estancas, a causa de las corrientes de convección. El alesado debe ser por lo menos 1 cm más grande que el diámetro del vidrio, los bloques de centrado lateral y dorsal mantendrán el espejo a no menos de 5 mm del metal.

Ref.	Designación de la pieza	Cant.
1	Espejo principal, Φ ext. 210, Φ óptico 200, F 1200	1
2	Espejo plano diagonal	1
3	Largueros	4
4	Grandes tableros del tubo	3
5	Tablero del lado de la puerta de inspección	1
6	Elementos del marco de la extremidad	8
7	Fondo de la celda del tubo	1
8	Puerta de inspección	1
9	Refuerzo de los muñones	2
10	Base del porta ocular	1
11	Taco de apoyo lateral	2
12	Muñón	1
13	Tuerca de apoyo del tornillo calante	3
14	Tuerca de apoyo del tornillo lateral	1
15	Tornillo calante	3
16	Tornillo lateral	1
17	Pata de seguridad	2
18	Pata de seguridad en forma de escuadra	1
19	Cierre de la puerta de inspección	1
20	Porta ocular completo	1
21	Araña completa, soporte diagonal	1

Montaje del espejo diagonal

No obstante sus pequeñas dimensiones, el espejo secundario debe ser montado con las mismas precauciones que el grande. La solución de la figura 59 lleva tres pinzas que sirven a la vez de apoyos laterales y de cara; otra solución consiste en utilizar un tubo cortado en bisel, provisto de tres lengüetas dobladas para definir el plano de la cara óptica y torneado por lo menos 0,2 mm más grande que la proyección del espejo. En el caso de un espejo octogonal o rectangular, es más seguro el sistema de las tres pinzas. Si el instrumento se monta azimutalmente, conviene que haya un juego dorsal mínimo de 0,2 mm; el juego lateral, igualmente necesario, no es evidentemente una causa de desajuste en el caso de una superficie plana. Debemos asegurarnos que no existe ninguna presión sensible, escuchando el choque del vidrio contra las pinzas cuando se sacude ligeramente el soporte diagonal. Si el telescopio es un ecuatorial fotográfico, se puede temer que en ciertas posiciones se pierda uno de los tres contactos de la cara óptica; en este caso conviene pegar sobre el soporte diagonal tres calzas, de papel secante por ejemplo, dispuestas exactamente

en la vertical de las tres pinzas que asientan sobre la cara óptica; estas calzas no serán comprimidas, en el momento del montaje, sino únicamente por el peso del espejo, teniendo cuidado de no ejercer una presión suplementaria al ajustar los tornillos laterales de las piezas.

Soporte araña para el diagonal

La solución adoptada en la figura 59 es la indicada por Morse y utilizada también por Hargreaves. Las láminas de acero, en lugar de estar tendidas según un eje del tubo, están desplazadas. La ventaja del sistema es la de ofrecer una resistencia mucho mayor a la torsión, con una tensión de las láminas que es menor que con el sistema clásico y se la ha aprovechado aquí para reemplazar el acero templado por el dulce, lo que permite plegar las láminas a 90º y fijarlas de manera menos trabajosa. Naturalmente, es necesario cuidar el paralelismo de las láminas opuestas, para no provocar penachos suplementarios de difracción. Se sabe que estos penachos pueden evitarse con el uso de diafragmas perfilados o de brazos curvos[1]; la débil resistencia mecánica de estos últimos, no es una dificultad insuperable en el caso de instrumentos de 20 ó 30 cm de abertura; alentamos a aquellos que estén bien provistos de herramientas a construir soportes curvos provistos de anillos de refuerzo que no excedan 2 mm de diámetro en cada borde.

Porta ocular

Siempre es necesario prever:

1. Un movimiento rápido de suficiente amplitud que tenga en cuenta las diferencias de enfoque a veces importantes entre los oculares.

2. Un movimiento de enfoque propiamente dicho, que debe ser extremadamente suave.

3. Una montura con juego es preferible a una muy ajustada, que no podría usarse sin hacer vibrar el telescopio.

Para los objetivos a f/15 que tienen una tolerancia de puesta a foco de un cuarto de mm, es ventajoso el empleo de un movimiento a cremallera; por el contrario, con nuestros espejos a f/6 ó f/8, la tolerancia de puesta a foco es del orden de 1/20 de mm solamente y el movimiento a tornillo con paso de 2 mm, dirigido por un pequeño cabestrante de 4 brazos ha demostrado ser muy práctico. La rotación del ocular sobre sí mismo, evidentemente no tiene importancia con un ocular correctamente centrado; solo cuando se emplean accesorios especiales, como una cámara fotográfica, deberá preverse una montura ocular desmontable.

[1] A. Couder, L’Astronomie.

6. La montura azimutal

Principio

La montura azimutal de A. Couder, adoptada para el telescopio estándar S. A. F. (Societé Astronomique de France) es de concepción cinemática, es decir, que las piezas, en movimiento relativo poseen el número exacto de puntos de contacto necesarios para dejar el grado útil de libertad. Repitamos aquí la idea fundamental que dirige tal realización: *Todo cuerpo rígido posee seis grados de libertad*. Para lograr el movimiento azimutal tenemos una horquilla – cargada lateralmente por el telescopio – que gira alrededor de un eje vertical (figura 60, referencia 34) cuya extremidad cónica penetra en una placa agujereada (ref. 32) eliminando así 3 grados de libertad; el agujero cónico es prácticamente equivalente al enchufe triédrico ideal. Bajo el efecto de la carga, llevada en falso, la horquilla tiende a balancearse, lo que presiona fuertemente la placa (ref. 33) contra la parte inferior cilíndrica del eje; esto determina dos nuevos contactos que hacen perder también dos grados de libertad y no permite sino un solo desplazamiento relativo posible: la rotación en azimut. La ventaja de este sistema es la de admitir un movimiento totalmente exento de juego sin ningún ajuste; la construcción más torpe da tan buenos resultados como la de un mecánico experto[1].

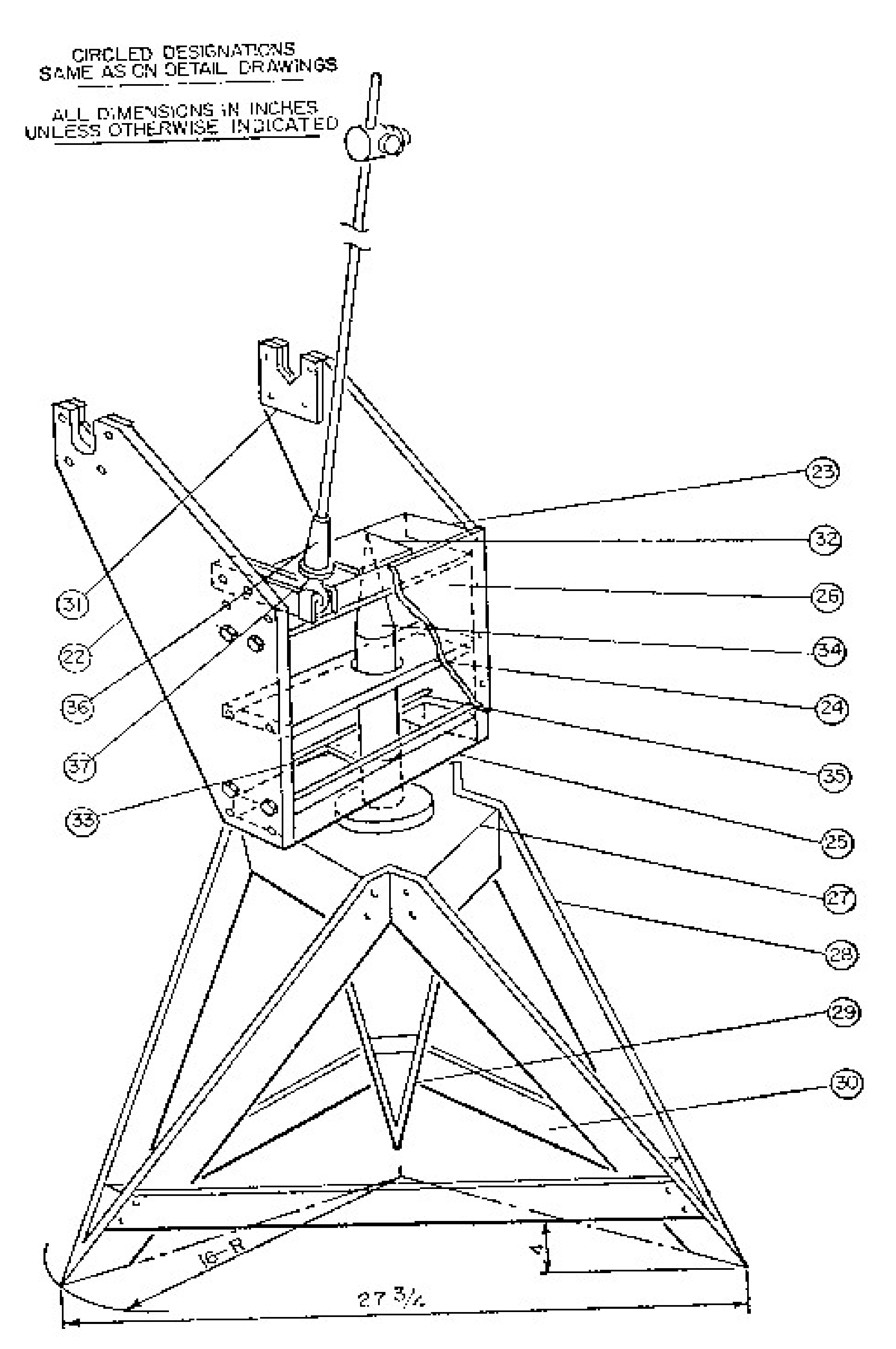
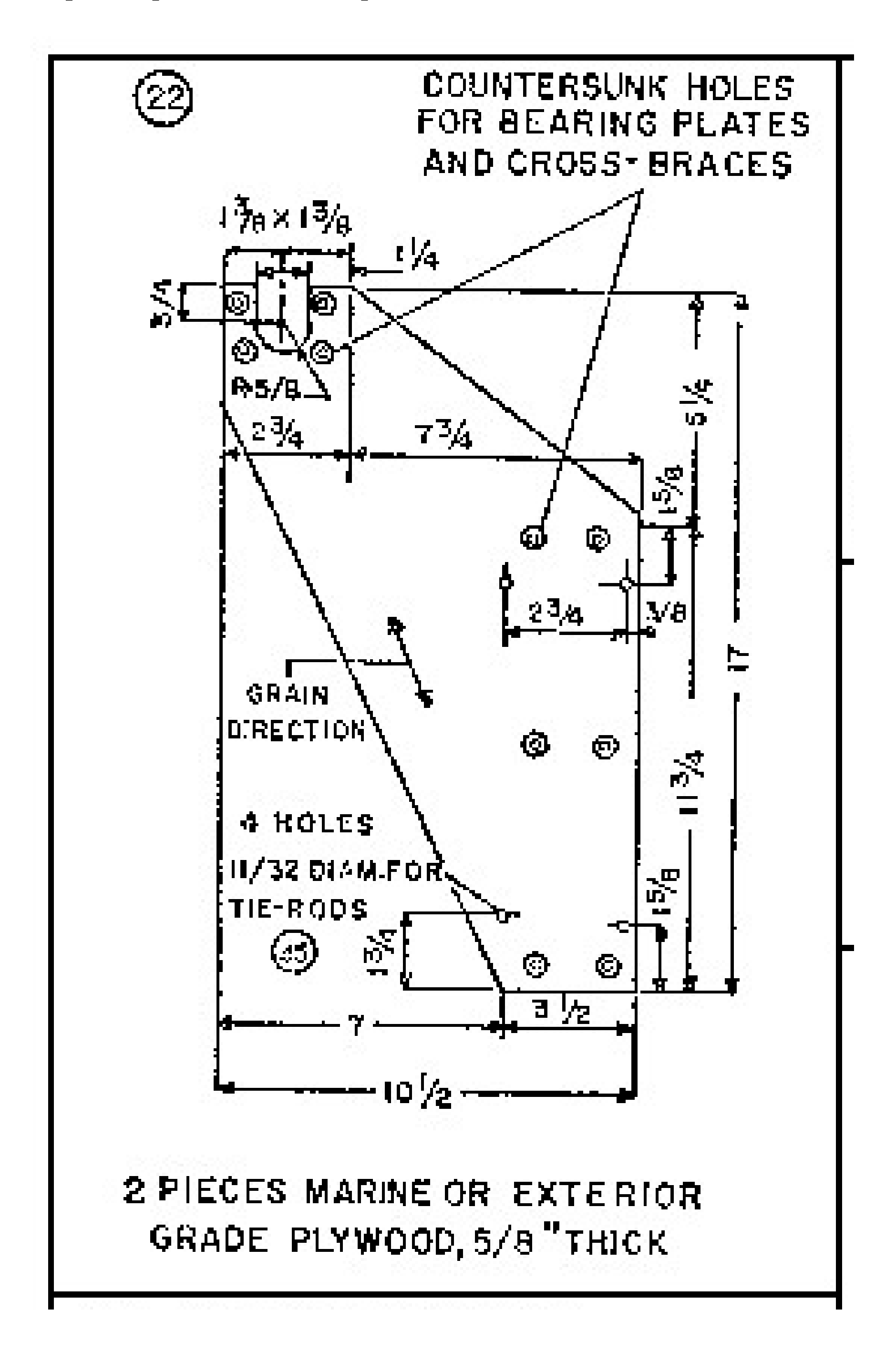
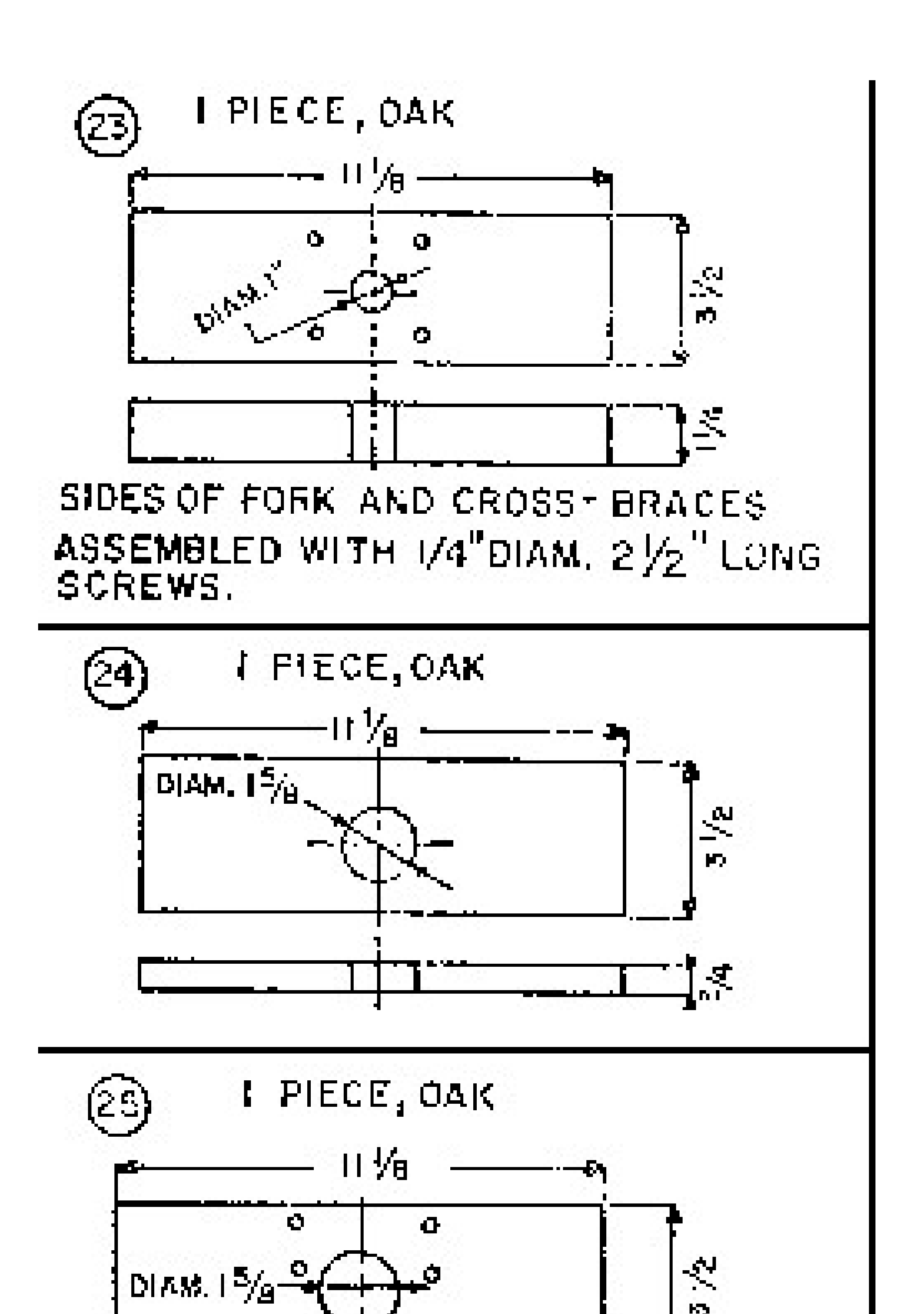


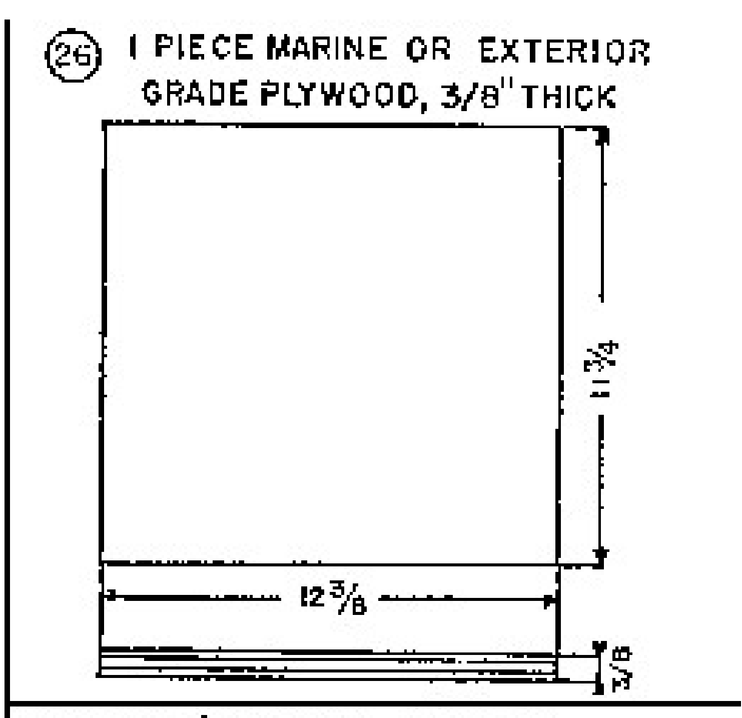
Fig 60. Conjunto del montaje del pie azimutal

El movimiento en altura importa igualmente una rotación de los muñones del telescopio sobre las V de las placas (ref. 31). Esta vez no hay sino cuatro contactos sobrando un grado de libertad: una translación horizontal del telescopio dentro de los límites de un juego lateral dejado, voluntariamente, muy notable. Bien entendido que esta traslación, incapaz de provocar un desapuntamiento, no tiene inconveniente.

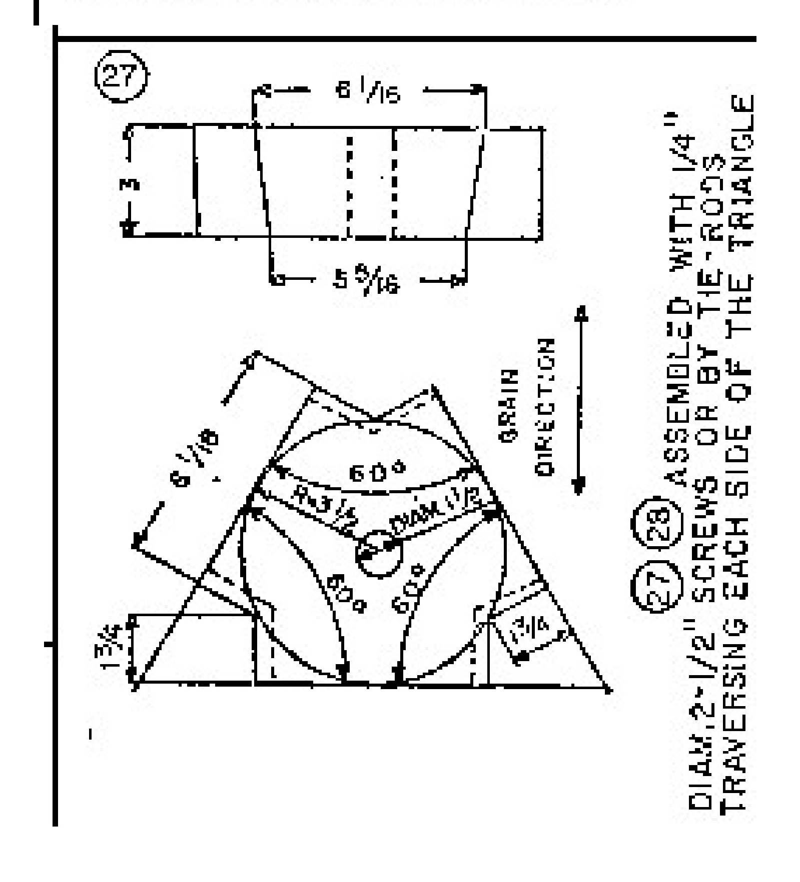




23
1 PIECE, OAK
11 1/8
DIAM. 1"
3 1/2
1 1/4
SIDES OF FORK AND CROSS-BRACES
ASSEMBLED WITH 1/4" DIAM. 2 1/2" LONG
SCREWS.
24
1 PIECE, OAK
11 1/8
DIAM. 1 5/8
3 1/2
3/4
25
1 PIECE, OAK
11 1/8
DIAM. 1 5/8
3 1/2
1 1/4



1 PIECE TAKEN FROM SELECT FIR BEAM MAY ALSO BE MADE BY GLUEING 3 ONE INCH LAYERS. SIDE DIMENSION OF 6 1/16" MAY OPTIONALLY BE INCREASED



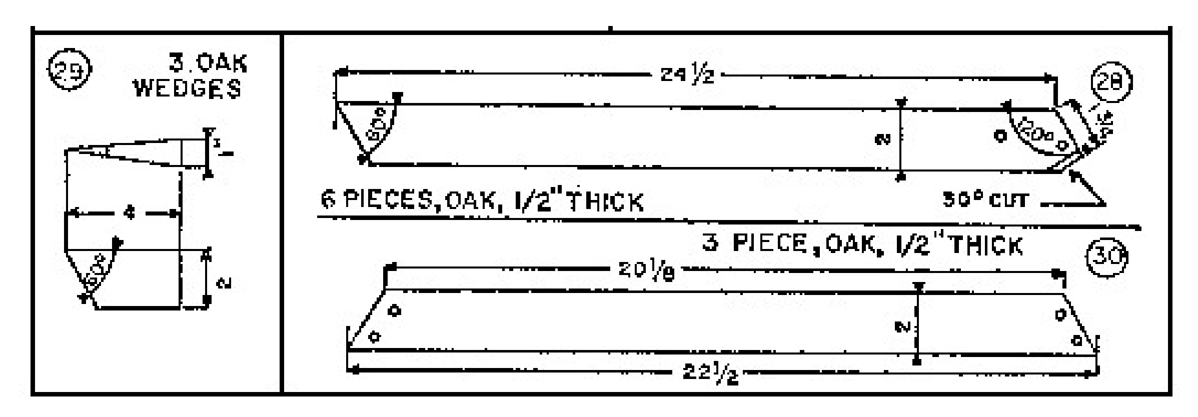
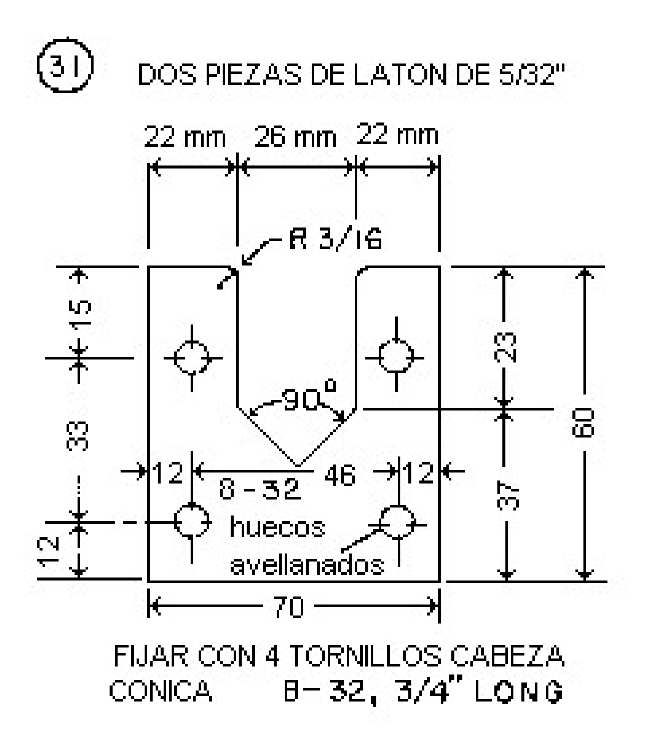


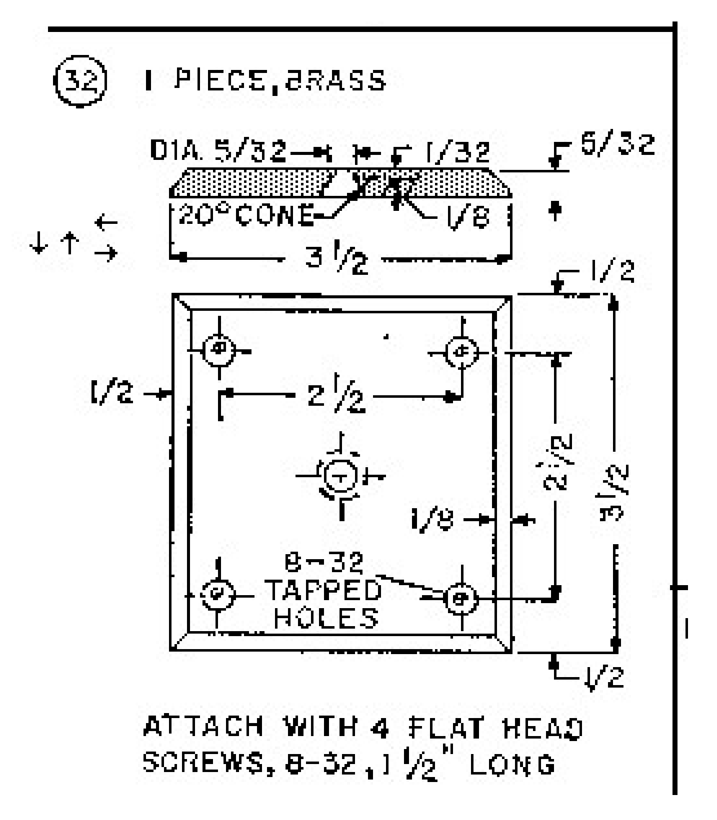
Fig 61. Piezas en madera del pie azimutal

Detalles importantes o interesantes

Eje azimutal

(Ref. 34). Este eje, notablemente cargado en su extremidad libre, constituye el punto débil del sistema. La sobrecarga variable debida al viento, provoca vibraciones imperceptibles en la punta del eje, pero considerables para el observador que mira con 300 ó 400 aumentos. Las vibraciones se amortiguan tanto más difícilmente cuanto el telescopio es más largo y más pesado, y el eje más largo y menos rígido. Aquellos que luego de un elemental cálculo de resistencia se tentaran a reducir por ejemplo a 20 mm la sección del eje, deberían pensar en la verdadera naturaleza del problema para un instrumento astronómico, cuya primera cualidad es la estabilidad. El coeficiente de trabajo del metal, por ridículamente débil que sea, no es un argumento sólido frente a la amplitud de las vibraciones (un cálculo de flecha puede dar algunas indicaciones, resultando que una variación por flexión de 10 segundos de arco o 2 centésimos de mm en la extremidad del eje es intolerable), a su frecuencia y a la duración de su amortiguamiento.

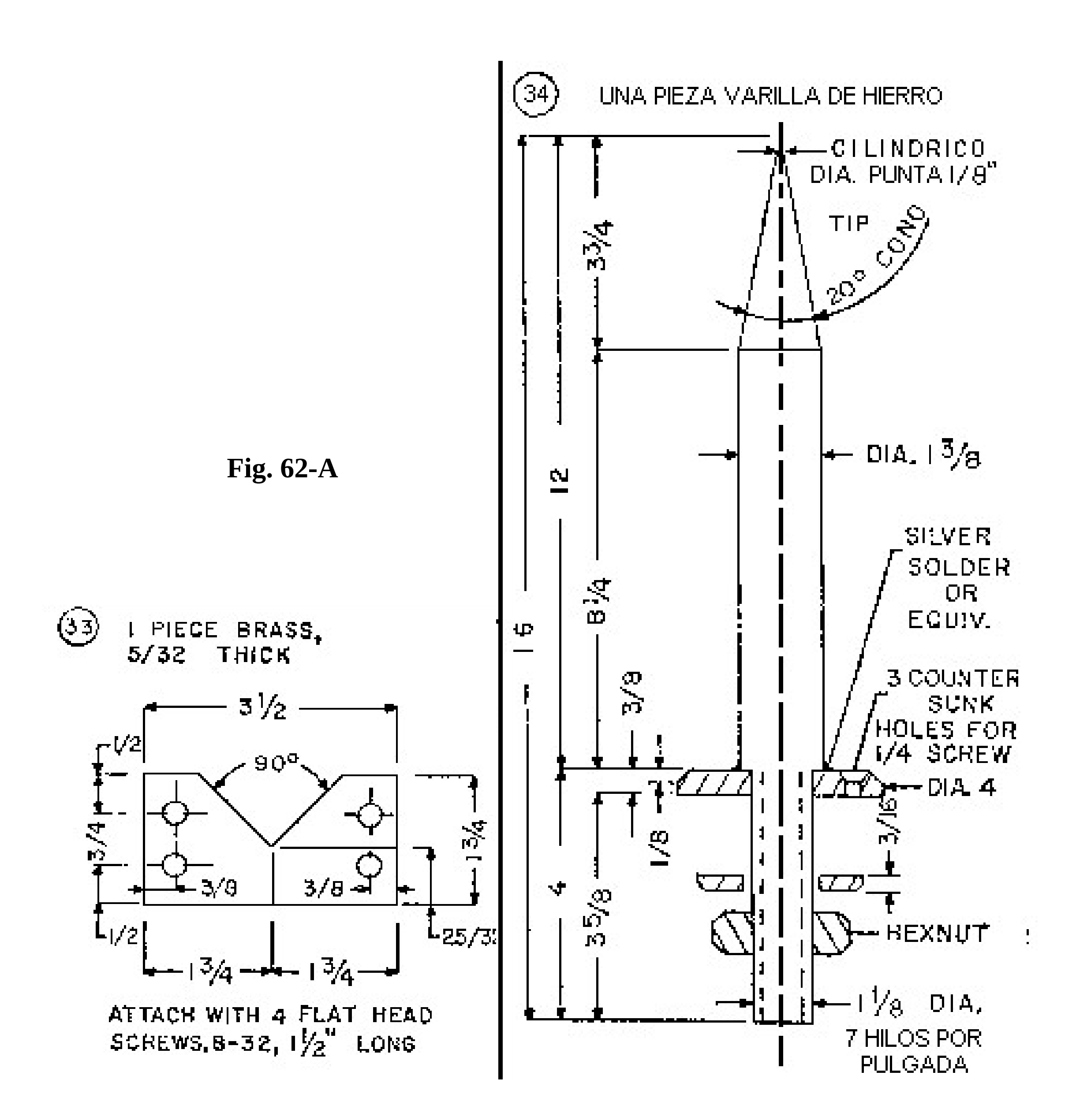




32
1 PIECE, BRASS
DIA. 5/32
1/32
5/32
20° CONE
1/8
3 1/2
1/2
1/2
2 1/2
2 1/2
3 1/2
1/8
8-32
TAPPED
HOLES
1/2
ATTACH WITH 4 FLAT HEAD
SCREWS, 8-32, 1 1/2" LONG

Fig. 62-A

Fig. 62-A



34
UNA PIEZA VARILLA DE HIERRO
CILINDRICO
DIA. PUNTA 1/8"
TIP
20° CONO
DIA. 1 3/8
SILVER
SOLDER
OR
EQUIV.
3 COUNTER
SUNK
HOLES FOR
1/4 SCREW
DIA. 4
3/16
HEXNUT
1 1/8 DIA.
7 HILOS POR
PULGADA
3 3/4
12
8 1/4
16
3/8
4
3 5/8
1/8
33
1 PIECE BRASS,
5/32 THICK
3 1/2
1/2
90°
3/4
1 3/4
3/8
3/8
1/2
25/32
1 3/4
1 3/4
ATTACH WITH 4 FLAT HEAD
SCREWS, 8-32, 1 1/2" LONG

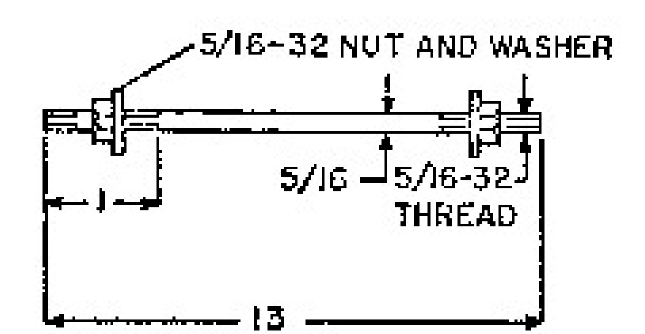


Fig.

Ref.	Designación	Cant.
22	Laterales de la horquilla	2
23	Traviesa superior	1
24	Traviesa media	1
25	Traviesa inferior	1
26	Placa de cierre	1
27	Cabeza del pie	1
28	Elemento de pata del trípode	6
29	Taco de unión	3
30	Traviesa de las patas del trípode	3
31	Placas cojinetes de los muñones	2
32	Chapa 3 puntos del eje azimutal	1
33	Chapa 2 puntos del eje azimutal	1
34	eje azimutal	1
35	Tensores del conjunto de la horquilla	4
36	Soportes de estabilidad a tornillo	1
37	Pieza de unión del soporte de estabilidad	1

Es más simple y más seguro atenerse a las conclusiones prácticas de los colegas que han intentado experiencias a su costa, cambiando a veces tres y cuatro ejes antes de aceptar el gasto indispensable de un diámetro suficiente. He aquí los diámetros mínimos recomendables, basados en los resultados obtenidos con 150 telescopios de características aproximadas al instrumento estándar.

- 30 mm para un telescopio de 150 a 180 mm a f/D = 6 de construcción liviana. Peso aproximado 8 Kg
- 35 mm para el telescopio estándar de 200 mm según los planos, que pesa aproximadamente 12 Kg
- 40 mm para un 200 mm, robusto de paredes gruesas o de tamaño grande, que pesa menos de 20 Kg
- 50 mm para un 250 mm que no pese más de 30 Kg

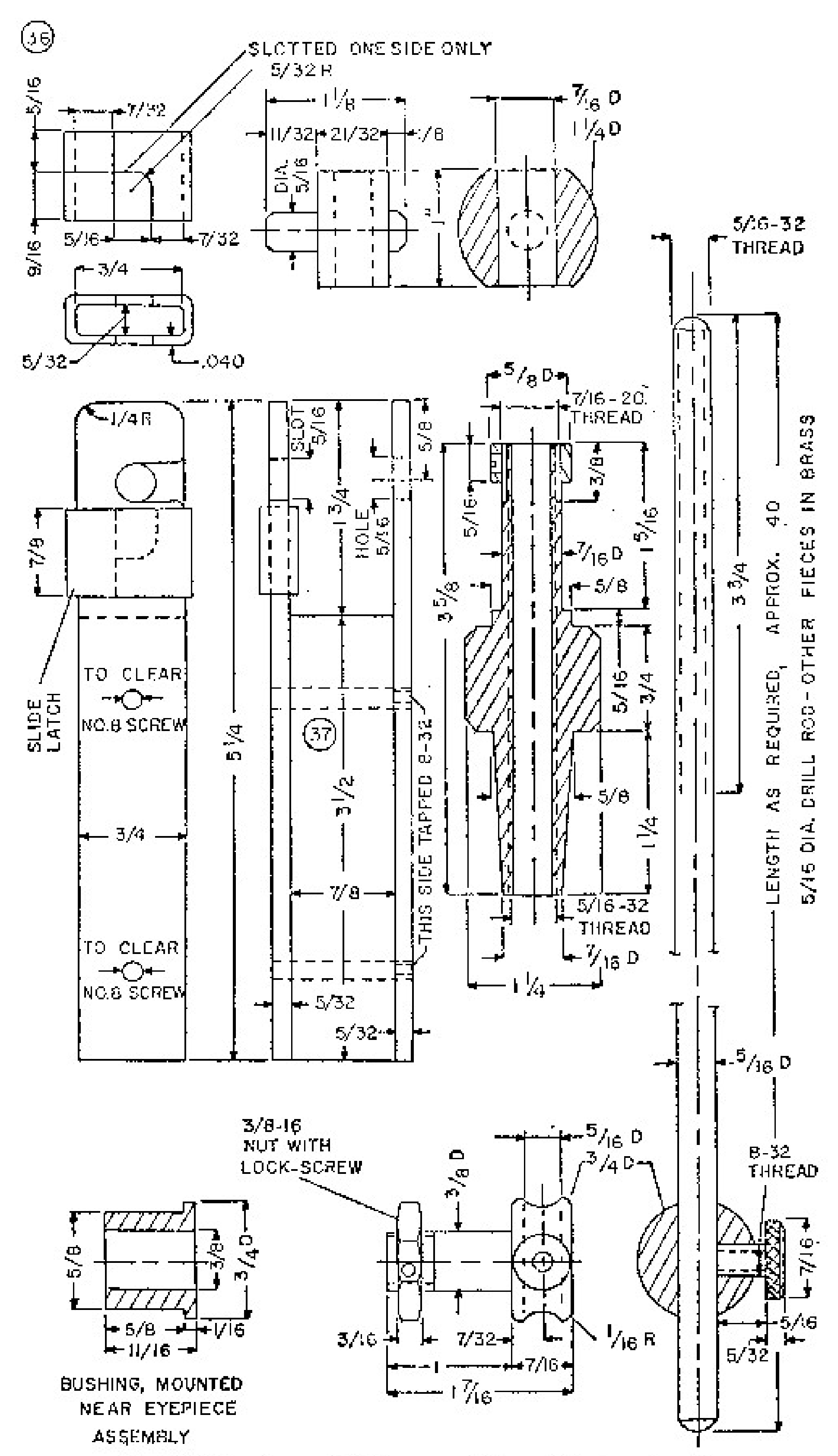


Fig 62B. (Continuación) Piezas metálicas del pie azimutal

Más allá de esta dimensión, la montura azimutal a horquilla lateral debe considerarse como carente de rigidez y no se aconseja; una montura ecuatorial bien estudiada, cuyo costo de fabricación esté justificado por el carácter definitivo de la instalación, se impone para el aprovechamiento racional de tales instrumentos; es una falta de sentido emprender la fabricación de un espejo de 300 mm o más si uno no está decidido a realizar los gastos necesariamente elevados, de una robusta montura ecuatorial.

Armado de la horquilla

Es necesario destacar la importancia de los tensores (ref. 35) que atraviesan totalmente la horquilla. Semejante ensambladura es mucho más rígida que la que se fija únicamente con tornillos en el extremo de la madera; además si las maderas llegan a tener un poco de juego basta dar un golpe de llave a las tuercas para restituir al conjunto su rigidez primitiva. La tabla de cierre (ref. 26) también mejora la solidez de la horquilla.

Freno del eje y movimiento lento en azimut

Los que usan la montura estándar se lamentan algunas veces de la gran movilidad del instrumento en azimut, lo que los obliga a colocarlo en estación con su eje bien vertical y a cuidarse del viento. Para remediar parcialmente este inconveniente, se ha aumentado el frotamiento sobre el punto triple adoptando para el cono del eje azimutal (ref. 34) un ángulo de solamente 20º. Se puede disponer así, enfrente de los contactos de la V inferior de un freno de eje ajustable, fácil de imaginar. Una solución más perfeccionada consiste en montar sobre el eje una pieza para presionar (puede ser de madera) con su extremidad libre presionada por un fuerte resorte contra un tornillo llevado por la horquilla, lo que permite un movimiento lento en azimut. Creemos inútil insistir sobre estos detalles que cada uno querrá considerar de acuerdo con sus preferencias o deseos personales.

Cabeza de trípode

(Ref. 27). Se adoptará un gran espesor, que asegure un buen encastre del eje azimutal, y una longitud suficiente para la base de triangulación de las patas del trípode (en nuestro diseño tiene 156 mm). La ventaja de un trípode como éste cuyas patas son triangulares, es que los elementos (ref. 28) trabajan casi exclusivamente a la tracción y a la compresión; la rigidez es enorme aun con listones muy flexibles.

[1] Lo malo de este montaje es cuando se emplea la montura en un piso no horizontal. Necesita entonces de una abrazadera hecha con una "u" de espárrago de ¼" rodeando el cilindro y apoyada con tuerca y mariposa en una platina en forma de "H" fija a las traviesas media e inferior.

7. Accesorios terminación centrado

Buscadores

Para apuntar cómodamente un instrumento cuyo campo es inferior a medio grado, es necesario un buscador. Describamos algunas disposiciones comunes fáciles de realizar y destinadas a los telescopios tipo Newton:

Con frecuencia uno se contenta con un simple visor (figura 64A) desprovisto de óptica, constituido por un diafragma de campo y un agujerito para mirar. Sobre el fondo del cielo nocturno la silueta del diafragma de campo no es visible si la corona no es bastante grande; se la puede pintar de blanco del lado vuelto hacia el observador e iluminarla muy débilmente en caso de necesidad con una lámpara que sirve para tomar notas. A menudo se utiliza pintura fosforescente; un aficionado americano ha descrito un anillo de campo formado por un tubo de vidrio con la materia fosforescente protegida y pegada contra las paredes interiores. En el comercio se consigue el “Telrad” que es un visor con un vidrio a 45º con círculos concéntricos iluminado a pilas.

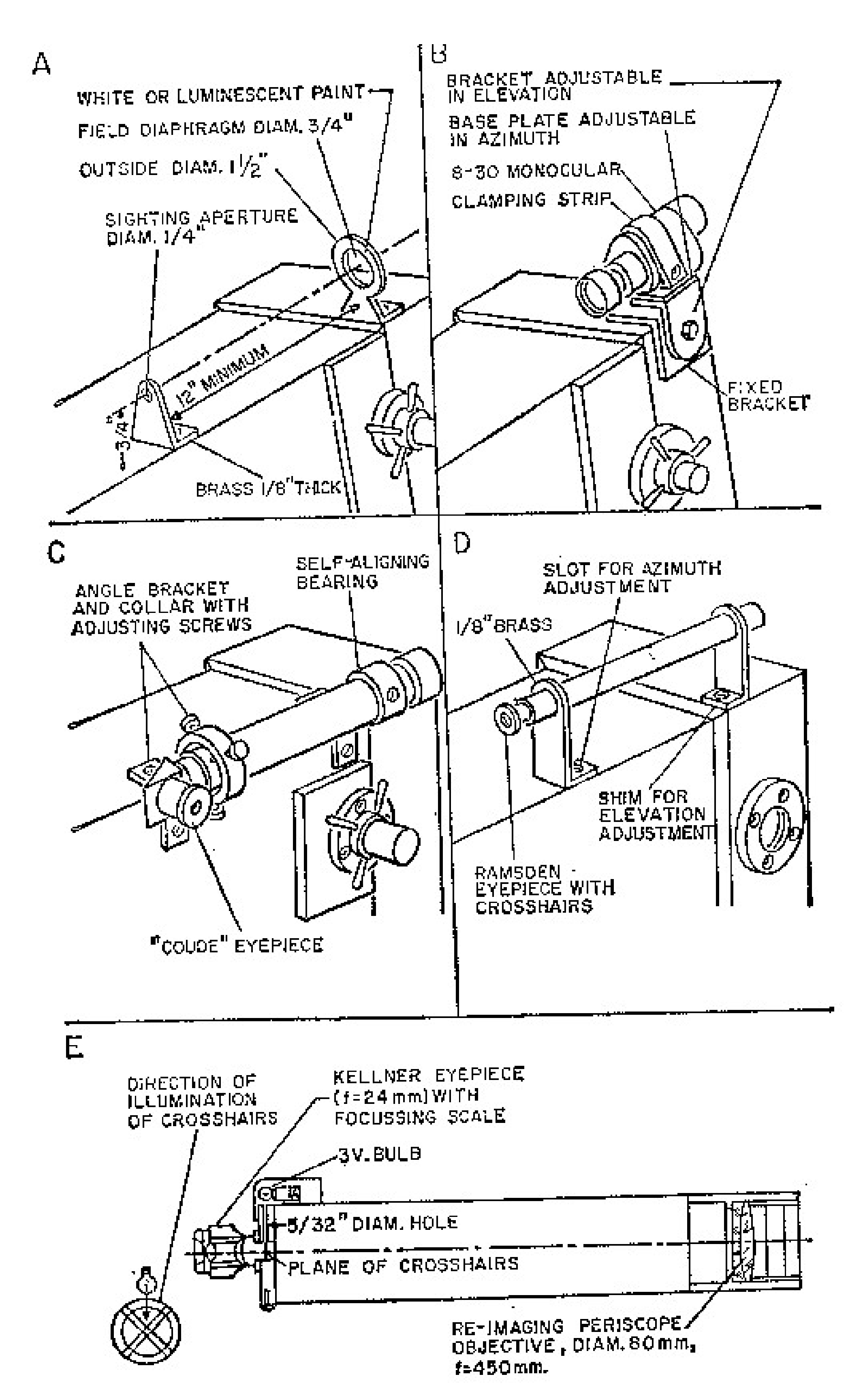


Fig 64. Algunos tipos de buscadores

A pesar de todo, estos visores son poco prácticos cuando el astro que debe apuntarse desciende a la ó magnitud. La acomodación del ojo no puede hacerse simultáneamente sobre la estrella y sobre el diafragma y resulta bastante dificultoso centrarla. Por lo tanto un verdadero buscador no es un lujo.

Muchas veces se posee un pequeño anteojo de 20 a 40 mm de objetivo; los largavistas de varias secciones no son suficientemente rígidos y para garantizar la estabilidad del paralelismo de los ejes ópticos, deberá proveérselos de una pieza de refuerzo.

Por el contrario, puede lograrse un excelente buscador con un anteojo monocular de prisma. El objetivo por ejemplo, puede tener un diámetro de 30 mm; el aumento corriente será de 8 y el campo de 6 ó 7º (figura 64B); generalmente el ocular es positivo (Kellner o derivado). Por lo tanto es fácil interponer justamente delante del lente de campo, una corona de cartón que lleve una cruz en hilos que debe estar a foco al mismo tiempo que la imagen. Para asegurar una posición invariable sin romper el monocular, puede usarse un collar y una plataforma provista de una V adecuada. El empleo de un anteojo inversor de imágenes demuestra ser particularmente ventajoso, con poco aumento y un gran campo, para las comparaciones con las cartas del atlas que se tenga a mano. Existen monoculares a prismas mucho más potentes, tales como los anteojos de artillería que generalmente tienen objetivos de 75 mm y 15 ó 20 aumentos, pero su peso y su precio son algo excesivos para un telescopio estándar.

La figura 64C representa el montaje clásico de un anteojo de aproximadamente 40 mm montado sobre una base en ángulo y collar con tornillos de centrado. El tubo del anteojo es a menudo reforzado al nivel de la base mencionada y provisto de un collar de refuerzo para el apoyo sobre la otra base. También es posible utilizar dos soportes iguales con collar y tornillos. Un ocular con unión giratoria y un prisma de reflexión total permiten utilizar cómodamente el buscador sin ser molestado por el tubo del telescopio. Nosotros preferimos los buscadores rectos para las comparaciones directas con los documentos de identificación que eventualmente deberían de invertirse (es decir girados 180º), mientras que con un ocular acodado el campo es simétrico y es necesario observar las cartas (estelares) por transparencia o por medio de un espejo. ¡Un buscador, como su nombre lo indica, debe servir también para buscar!

Un montaje más modesto se indica en la figura 64D. El pequeño anteojo puede tener un objetivo de 20 a 30 mm de abertura y 200 a 300 mm de longitud focal. Será por ejemplo, un doblete acromático tipo Cliraut o el elemento frontal de un antiguo objetivo fotográfico aplanético. El ocular será un Ramsden de unos 30 mm de longitud focal, apuntando a una cruz de hilos de 50 a 100 μm de diámetro (hilo de cobre de bobinados eléctricos (# 40 ó más), lo que en caso extremo permite evitar su iluminación. Los soportes, soldados al tubo, serán bastante altos: de 80 a 100 mm para que permitan apuntar fácilmente al menos con un solo ojo; cuando uno no pueda servirse indistintamente del ojo derecho o del izquierdo, es necesario en consecuencia, elegir el emplazamiento del buscador. La figura 64 se refiere a instrumentos montados para el ojo izquierdo. El ajuste en azimut del buscador, puede lograrse por un agujero oval en uno de los soportes, mientras el ajuste en altura se hace por

calzas de espesor variable. Puede preguntarse ¿cuáles son las características ópticas de un buen buscador? Un campo de 3 a 6º parece indicado. Tomemos la primera cifra: con un ocular de 50º de campo aparente, estaremos obligados a no exceder alrededor de 17 aumentos (50/3 = 16,7); para una pupila de 5 mm necesitaremos un objetivo de 85 mm de abertura. Puede construirse económicamente y bastante rápido un potente buscador de características muy parecidas por medio de piezas de óptica provenientes de sobrantes que se encuentran en ocasión (mercado de las "pulgas"). El que está montado en nuestro telescopio tiene 19 aumentos, un campo de 2º 45', una abertura de 80 mm y por consecuencia una pupila de 4 mm aproximadamente (figura 64E). No pesa más de 1500 gr. y permite hallar con la mayor comodidad objetos que figuran en el gran atlas de Argelander; la nebulosa de la Lyra ya es reconocible; se trata de un verdadero pequeño R. F. T. (Rich Field Telescope). La figura 64E muestra la disposición adoptada para iluminar los hilos sobre fondo oscuro: la luz enviada por un pequeño bombillo de linterna de 3,5 V y llega casi tangencialmente sobre los hilos y un pequeño cuadrado de 1,3 mm en el plano focal (aproximadamente 10') permite un apuntamiento preciso, evitando totalmente ocultar el astro apuntado.

Pintura del telescopio

Para proteger la madera de las variaciones del estado higrométrico del aire, capaces de provocar descentrados muy frecuentes, puede emplearse aceite de lino con secante y barniz. El empleo de una pintura bien clara, con preferencia un esmalte blanco, asegura además cierta protección contra el calentamiento diurno, que siempre debe ser cuidadosamente combatido si se desea tener buenas imágenes al comienzo de la noche. El interior del tubo y las piezas metálicas cercanas al haz (portaocular, soporte del diagonal) deben ser de un negro muy mate. La mayor parte de los barnices del comercio son muy brillantes para este fin; es fácil preparar uno mismo un barniz suficientemente adherente, aun sobre el latón, incorporando un gran volumen de negro de humo a una solución diluida de gomalaca en alcohol desnaturalizado; el alcohol para lustrar es mejor que el alcohol de quemar ordinario.

Plateado o aluminizado de los espejos del telescopio

El plateado químico y el aluminizado por evaporación en el vacío son los dos procedimientos más empleados actualmente para metalizar un espejo de telescopio.

El antiguo procedimiento (Liebig – Drayton, 1843) de reducción de una sal de plata por un azúcar, permite obtener fácilmente plateados delgados (0,1 μm aproximadamente) sobre espejos de vidrio para telescopios (**Foucault** 1857). Actualmente el procedimiento conserva todo su valor: el poder reflector de la plata es muy elevado en el espectro visible (figura 9) y alcanza aun al 98 % en el infrarrojo. La operación es desde todo punto practicable y recomendada al aficionado aislado que no depende más que de sí mismo y no puede correr el riesgo de un transporte de espejos. Los inconvenientes del plateado son: desigualdades frecuentes en el espesor del depósito, que dependen principalmente del estado de la superficie del vidrio y no son jamás ópticamente despreciables; rápida sulfuración en presencia de hidrógeno sulfurado (cocinas) que hacen descender muy rápidamente el poder reflector, especialmente en el violeta y el azul y requiere repulidos cada 15 días y replateado dos veces por año si se desean espejos realmente en perfecto estado; no obstante, casi siempre uno se contenta para las observaciones visuales, con plateados viejos de varios años según los factores de alteración, a menudo muy reducidos en el campo, lejos de las fábricas y cuando el aire es muy seco; otro inconveniente, es la difusión debida a los millones de minúsculas rayitas producidas inevitablemente por el pulimento de la capa.

La aluminización por evaporación en el vacío, introducida por Strong en 1931, proporciona capas reflectoras realmente impecables sin pulimentado posterior; el metal reproduce sin difusión visible, el estado de la superficie del vidrio mismo. La uniformidad del espesor se obtiene con la adopción de precauciones elementales y con una precisión tal, que los exámenes ópticos más sensibles no muestran ninguna alteración de la forma. El poder reflector del aluminio en el espectro visible no pasa del 88%, lo que no constituye una grave desventaja con respecto a la plata, excepto quizá en lo referente a las radiaciones infrarrojas, que no son tan bien reflejadas y que hacen al espejo más sensible a los efectos térmicos, por ejemplo en el caso de observaciones solares. Por el contrario, en el ultravioleta, el poder reflector es mucho más elevado que el de la plata y esta ventaja se extiende también a las radiaciones visibles de corta longitud de onda (violeta, azul) cuando la plata comienza a sulfurarse. La resistencia de los aluminizados a la intemperie es muy grande; se forma una capa de alúmina transparente muy dura (corindón) que demora considerablemente los intercambios químicos, aun en el aire húmedo. Se estima que un aluminizado rinde un buen servicio durante 5 años. La principal causa de destrucción, como en el caso de la plata, proviene del polvo graso y de los inevitables depósitos sobre un espejo no protegido que terminan por provocar una luz difusa sensible. La superioridad del aluminizado, en este aspecto, es la de resistir bastante bien un lavado.

Plateado químico de los espejos

Las cuatro recetas más empleadas son las de Brashear, de Martin, al formol y a la sal de Rochelle.

Los procedimientos al formol descritos por Lumière y a la sal de Rochelle descrito especialmente por Draper, quizá puedan resultar un poco más fáciles, aunque el segundo brinda resultados mucho mejores; además, a causa de la formación muy lenta en el depósito se recomienda especialmente para los semiplateados.

El excelente procedimiento de Brashear, utilizado casi exclusivamente entre nuestros colegas americanos[1] fue el objeto de una detallada descripción en el bulletin por nuestro malogrado colega Ch. Boulet[2]; nosotros preferimos no obstante, la receta llamada de Martín[3] que importa manipulaciones menos delicadas; este procedimiento ha sido también descrito en el Bulletin por A. Danjon[4]. Tomamos aquí la última receta dada[5], que es más práctica aún, gracias al reemplazo del amoníaco puro, cuyo título de 22º Baumé es muy problemático, por el nitrato de amonio, fácil de pesar con exactitud.

El material necesario para platear un espejo comprende: un plato esmaltado un poco más grande que el espejo, un recipiente bastante grande y muy limpio para los enjuagues, un gran vaso de precipitación de un litro para la preparación del baño, una probeta graduada de 250 $cm^{3,}$ algodón hidrofílico y guantes de caucho. Se requieren al menos 5 litros de agua destilada que ofrezca todas las garantías (¡cuidado con el agua vendida a bajo precio por los farmacéuticos y ferreteros!) para la preparación de las soluciones y los lavados, El ácido nítrico fumante para la limpieza y todos los productos químicos que entran en las soluciones, deben ser muy puros y de reciente entrega si es posible. Todos los recipientes estarán bien limpios, al punto que la menor traza de sal de cocina, por ejemplo, bastaría para hacer fracasar la reacción[6]; los guantes de caucho bien limpios, protegerán totalmente las manos contra el ácido nítrico y la potasa cáustica y evitarán las trazas de transpiración que podrían contaminar el baño de plateado o el espejo.

Las cuatro soluciones a preparar son las siguientes:

A. Nitrato de plata cristalizado ……………………………………….60 gr

Agua destilada hasta completar …………………………………1000 cm^3

Se conserva bien en un frasco color caramelo con tapón esmerilado. Mancha fuertemente los dedos de negro, igual que el baño de plateado.

B. Nitrato de amonio cristalizado …………………………………….90 gr

Agua destilada hasta completar …………………………………1000 cm^3

Frasco con tapón esmerilado.

C. Potasa cáustica pura (hidróxido de potasio) ……………………150 gr

O bien, Soda cáustica pura (hidróxido de sodio)………………….105 gr

Agua destilada hasta completar…………………………………...1000 cm^3

Frasco con tapón de caucho. Deben tomarse precauciones cuando se trituran cilindros o pastillas de potasa o soda, productos muy cáusticos, protegiendo los ojos con gafas adecuadas.

D. Azúcar blanca de mesa (sacarosa) …………………………….100 gr

Ácido tartárico …………………………………………………..5 gr

Alcohol de 90º …………………………………………………150 gr

Agua destilada hasta completar ……………………………….1000 cm^3

En una pequeña cacerola esmaltada y muy limpia, se disuelve el azúcar y el ácido tartárico con un poco de agua destilada; se lleva todo a ebullición; se la deja hervir a fuego lento durante 10 ó 15 minutos para la inversión del azúcar; se enfría con un poco de agua destilada antes de agregar el alcohol, que tiene el papel de conservador, y se completa finalmente el litro con agua destilada. Esta solución reductora debe estacionarse al menos una semana y mejora sensiblemente con el envejecimiento. Por el contrario, las soluciones B y C, si son de fabricación un poco vieja, dan resultados inciertos; deben prepararse poco tiempo antes del uso con productos recientemente extraídos del frasco (fundir la parafina de los tapones de los frascos de soda y de nitrato de amonio).

Limpieza del espejo

La adherencia y la resistencia de la capa dependen ampliamente de la calidad del lavado. Es muy difícil limpiar perfectamente el vidrio; según el estado de la superficie, lo aplicado y la alterabilidad del vidrio, los resultados obtenidos serán muy distintos. Felizmente para un plateado, la experiencia enseña que muy a menudo basta una limpieza relativamente sumaria. Es cómodo disponer de una cubeta con paredes de caucho; en caso contrario se hará un pequeño cesto de madera con tacos laterales para poder frotar enérgicamente el espejo dentro de una pileta. Si el espejo está muy sucio, primero se eliminarán los restos de brea adheridos al dorso o sobre el canto con un trapo embebido en bencina o en nafta (gasolina); el rojo de pulir resiste de manera asombrosa a los agentes químicos comunes, siendo necesaria una acción mecánica; un buen método consiste en enjabonar el canto y el dorso y luego frotar con una goma abrasiva mojada (goma de máquina para escribir). Se termina por el bisel, cuidando mucho de no llegar a la superficie óptica; es necesario lavar cuidadosamente las partículas de goma, desde luego, sin frotar.

La limpieza de la cara óptica se hace con ácido nítrico fumante por medio de un gran hisopo de algodón y con la mano enguantada. El plateado viejo que eventualmente pueda quedar, es destruido instantáneamente y en este caso se lava con agua destilada y se reanuda la limpieza con hisopo y ácido nuevos.

El ácido nítrico concentrado es un enérgico agente oxidante; destruye las materias grasas y renovando 2 ó 3 veces el hisopo y el ácido, se termina por escuchar el ruido característico del hisopo de algodón sobre el vidrio limpio. Si el espejo estaba anteriormente aluminizado, antes de emplear el ácido nítrico es necesario quitar completamente el aluminizado con ácido clorhídrico o un poco de solución C (potasa o soda).

Por lo común uno se contenta con una sola limpieza con ácido, seguida de prolongados enjuagues y de una permanencia en agua destilada. Digamos algunas palabras acerca de limpiezas más completas que pueden ponerse en práctica en casos más difíciles. Un agente químico más enérgico o una acción mecánica pueden conducir al resultado deseado. La mezcla sulfocrómica es extraordinariamente eficaz, sobretodo en caliente, pero el peligro y además las dificultades de su uso, no alentarán a los aficionados a servirse de ella. Un buen procedimiento, ya utilizado por **León Foucault** consiste en emplear una papilla de carbonato de calcio amoniacal: se hace una pasta líquida con un poco de agua destilada, de amoníaco y de carbonato de calcio precipitado; se la extiende sobre toda la superficie del espejo y se la deja secar completamente; con varios hisopos de algodón (debe evitarse la contaminación por la transpiración o la grasa de las manos) se frota ligeramente la tiza y luego se insiste para eliminar por un frotamiento prolongado, el velo azul residual. Cuando la operación está bien hecha, el “empañado” que se obtiene con el aliento está constituido por un velo gris uniforme de micro gotitas sin estructura o trazas de secado. La operación se repite 2 ó 3 veces si es necesario y se termina por una limpieza con ácido nítrico concentrado. El espejo bien limpio, no debe secarse; se lo mantiene bajo una capa de agua destilada.

De acuerdo con la opinión general, la aplicación de un mordiente es conveniente aunque no indispensable, porque mejora la adherencia y la calidad del depósito: después de la limpieza, se sumerge el espejo durante 5 minutos en una solución amoniacal de cloruro estañoso; es necesario enjuagar con agua destilada inmediatamente antes de pasar el espejo al baño de plateado.

Modos de platear

A. (figura 65). Cara arriba. Es la disposición más económica, sobretodo para un espejo grande, aunque no pueden evitarse por completo pequeños agujeritos en la capa. La superficie del espejo sirve de fondo a una cubeta improvisada cuyos bordes se forman por medio de una larga faja de papel de embalaje parafinado por inmersión y apretado contra el canto del espejo ligeramente vaselinado para asegurar un recipiente estanco, por medio de varias vueltas de cordón elástico.

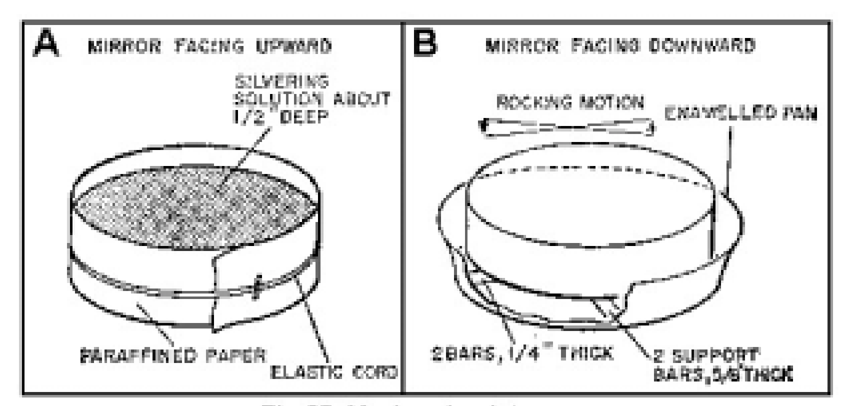


Fig 65. Modos de platear

B. (figura 65). Cara abajo. Es necesario un recipiente de fondo chato un poco más grande que el espejo; existen platos blancos esmaltados relativamente económicos. Para evitar el contacto del espejo con el fondo y poder producir cierta agitación por balanceo se pegan al fondo cuatro tacos parafinados de madera con un poco de resina según dos diámetros rectangulares, uno de ellos un centímetro aproximadamente más alto. No deben utilizarse tacos metálicos, mucho menos de plomo, que podrían provocar por electrólisis, grandes anomalías locales en el espesor del depósito.

Conducción de la operación

La temperatura es un factor esencial de éxito. Para trabajar en condiciones apropiadas debe operarse entre los 18 y 24ºC; no obstante Ellison obtuvo buenos resultados por el procedimiento Martin en el clima tropical de Ceylan a más de 30º C. Es preciso verificar la temperatura ambiente, la temperatura de las soluciones y la del espejo en su agua de inmersión. Conviene determinar de antemano el volumen de baño necesario haciendo ensayo con agua corriente. Para la disposición espejo cara abajo, particularmente si el dorso del espejo está pulido, el líquido no debe pasar de la mitad del espesor del espejo; puede seguirse así directamente el progreso del plateado. Para evitar un inútil derroche de plata, se tomarán 50 cm^3 de solución A por cada decímetro cuadrado de superficie del espejo a platear (aproximadamente 150 cm^3 para uno de 20 cm). Se vuelca este volumen de A en un gran vaso de precipitación, se lava la probeta graduada y se mide un volumen igual de solución B que se incorpora progresivamente en A agitando vigorosamente con una varilla de vidrio; lavemos una vez más la probeta y midamos un volumen igual de solución C, que se incorporará con las mismas precauciones a A – B. En principio, las últimas gotas de solución C deben enturbiar ligeramente la mezcla; el aspecto a plena luz es un poco parecido a una ligera infusión de té; si la mezcla permanece límpida podrán agregarse inmediatamente algunas gotas suplementarias de C. Si por el contrario la mezcla se oscurece fuertemente, hay que detener el vuelco, puesto que en este caso el depósito será rápido, brillante, pero delgado. No exageremos la dificultad en lograr el punto de estabilidad de la solución; con el procedimiento Martin la tolerancia es bastante grande. La mezcla que acabamos de obtener debe utilizarse inmediatamente. Es necesario no dejar ninguna porción no reducida de esta solución expuesta al sol, por ejemplo, puesto que su concentración ocasiona la formación de fulminato de plata, explosivo muy inestable de deflagración espontánea. Si el volumen del baño obtenido es inferior al volumen determinado más arriba, necesario para alcanzar el nivel útil, se agregará en consecuencia agua destilada.

Saquemos el espejo del baño en que está depositado y pongámoslo en contacto con la mezcla preparada; agreguemos un volumen de solución reductora D igual a un tercio del volumen empleado de A. La reacción comienza inmediatamente; el líquido se enturbia y se vuelve negro por completo; se debe balancear irregularmente el espejo para igualar lo mejor posible el depósito.

Al cabo de 2 ó 3 minutos y a 20º C se ve aparecer sobre el vidrio un hermoso reflejo metálico; no hay que sacar el espejo para examinarlo. Una permanencia 5 veces más larga es necesaria para obtener un depósito opaco. El precipitado puede considerarse concluido, cuando el baño se aclara y se ven sobrenadar partículas barrosas. Si el espejo está cara arriba, es conveniente evitar los depósitos barrosos o removerlos pasando ligeramente un copo de algodón sobre la superficie sin sacar el espejo del baño. Se retira el espejo del baño y se lo sumerge nuevamente en agua destilada para lavarlo; enseguida hay que asegurarse de la opacidad de la capa; un plateado grueso apenas permite ver por transparencia el sol o el filamento de una potente lámpara. Aun cuando los contornos de un objeto bien recortado en pleno día sobre el fondo del cielo sean perceptibles, el plateado podrá prestar un buen servicio. Si el plateado es muy débil, es necesario preparar inmediatamente un segundo

baño para reforzar el depósito. El secado del espejo debe hacerse con rapidez; después de un breve escurrido se lo mantiene casi en forma vertical y se lo rocía con alcohol puro. Se recomienda el empleo de un ventilador o secador de pelo y es preciso recoger las gotas que podrían escurrirse durante largo tiempo por la parte inferior, por medio de un papel secante.

Bruñido de la capa

Casi siempre la capa está ligeramente velada; una vez bien seca se la aclara por bruñido con una muñeca de gamuza. Ciertos depósitos gruesos y mates no son susceptibles de bruñido y es necesario eliminarlos y comenzar de nuevo. Para un espejo chico, se hace una muñeca rellenando con algodón un trozo de cuero llamado de gamuza nuevo, bien desengrasado, con el lado de los pelos hacia afuera y cuidadosamente cepillado y revisado[7]. La muñeca puede tener 4 ó 5 cm de diámetro. Se comienza por frotar un vidrio de prueba, de preferencia plateado, para verificar que no se dejan huellas. Hay que frotar toda la superficie del espejo con carreras en rizo, en tanto un cepillo de dientes servirá para eliminar las partículas de plata que podrían adherirse a la muñeca. Esta primera operación produce una suerte de abatanado de la capa que favorece el bruñido propiamente dicho. El cepillo de dientes es empleado enseguida para extender sobre la muñeca una muy pequeña cantidad de rojo óptico para pulir que terminará de repartir sobre el vidrio de prueba antes de pasar al espejo. Casi siempre estando todo bien seco, el espejo toma un reflejo negro uniforme en pocos minutos. Eventualmente, las manchas recalcitrantes se aclararán exhalándoles un poco de aliento antes de frotar. Debe frotarse lo menos posible, puesto que los millones de rayitas inevitables producidas por la muñeca sobre la blanda capa de plata, terminarán por producir cerca del haz, una difusión de luz tan grave como los débiles velos que son bien visibles en una dirección muy oblicua.

Aluminizado de los espejos

Nos limitaremos a una descripción superficial de esta técnica, solamente para satisfacer la curiosidad del lector constructor y evitarle algunos errores, aunque insuficientemente detallada como para permitirle emprender la operación que exige un material costoso[8].

La técnica debida en gran parte a John Strong[9] consiste en evaporar en el vacío pequeños jinetes de hilo de aluminio muy puro, colocados sobre hélices de tungsteno y calentados por el paso de una corriente eléctrica. El aluminio funde a 660º C; se forma una gotita que “moja” el tungsteno sin peligro de caer; el aluminio se evapora enseguida sobre las partes más calientes del filamento (1200º C). Si el recorrido libre molecular medio es del orden de magnitud del diámetro del recinto en que se hace el vacío (lo que ocurre para un vacío elevado, del orden de 10^{-4} ó 10^{-5} mm de mercurio), la invisible niebla de átomos de aluminio alcanza directamente la superficie a tratar y se condensa bajo la forma de una delgada capa metálica que reproduce fielmente el estado de la superficie del vidrio ópticamente pulido, sin ninguna semejanza con el metal aluminio macizo pulido mecánicamente. Para fijar ideas, digamos que en el caso de pequeños espejos se obtiene una capa de espesor bien uniforme, colocando los evaporadores sobre una corona de diámetro igual al del espejo y distante en una cantidad igual al radio; las hélices de hilo de tungsteno de 0,7 mm son calentadas por una corriente de 10 a 20 V y algunas decenas de amperios. Un tiempo de evaporación de 10 a 20 segundos basta para obtener una capa opaca (0,1 μm).

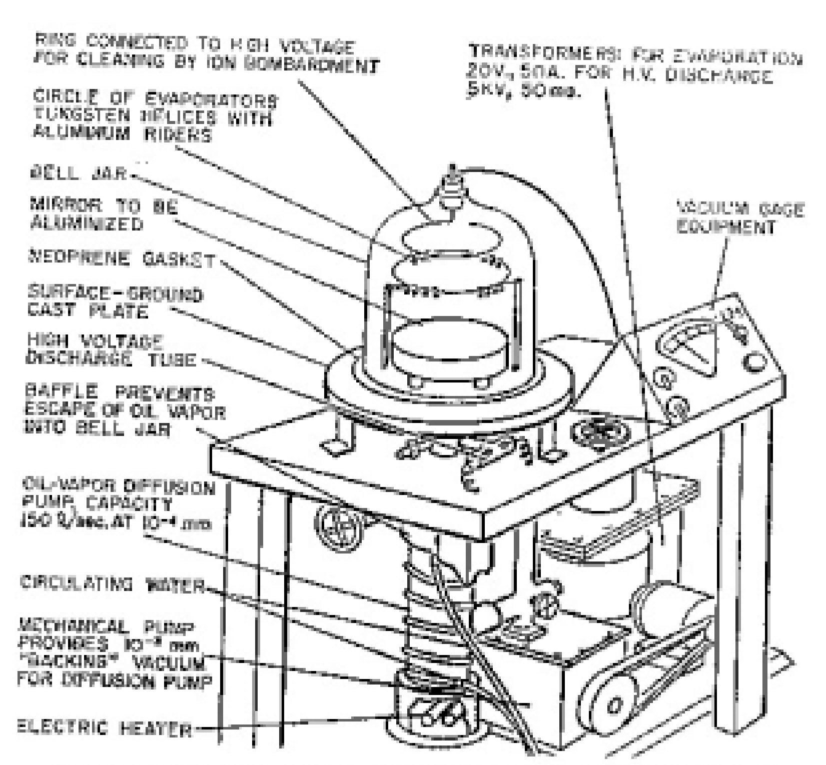


Fig 66. Esquema de una pequeña instalación de aluminizado

La primera dificultad reside en la perfecta limpieza de la superficie del espejo, absolutamente necesaria si se desea una capa durable. La operación es sensiblemente más delicada que para un plateado, puesto que es necesario obtener simultáneamente una superficie limpia y seca. Los velos grises uniformes de las figuras hechas con el aliento, de las cuales hemos hablado antes, muestran que subsiste uniformemente extendida, una capa en extremo delgada de ácidos grasos que pueden provocar después defectos notables. A causa de la afinidad de los iones alcalinos superficiales, la limpieza perfecta de ciertos vidrios es casi imposible. Un tratamiento químico enérgico, que comprenda la inmersión del vidrio durante 2 horas en al mezcla sulfocrómica hirviendo a 400º C[10] es eficaz, pero evidentemente imposible para un vidrio de óptica de precisión; Se recurre a la acción de iones en la campana de vacío durante el bombeo, haciendo una descarga de alto voltaje (5.000 a 10.000 voltios). Los técnicos saben que este procedimiento no está libre de sorpresas desagradables.

Las dificultades que entrañan los vacíos muy pronunciados son mejor conocidas y relativamente más fáciles de combatir. Es preciso descubrir y obstruir continuamente las pérdidas imperceptibles, pero que son siempre muy perjudiciales si no se dispone de potentes medios de bombeo. El escape de un solo milímetro cúbico de aire a la presión normal en un tiempo dado, requiere para ser compensado, una bomba que extraiga varias decenas de litros entre 10^{-3} y 10^{-5} mm de presión residual. Deben usarse deshidratantes, zulaques (mástic) y grasa para robinetes de muy débil tensión de vapor; las superficies que hayan absorbido gases necesitarán calentamientos previos, etcétera. Para una pequeña instalación de laboratorio uno puede contentarse con una bomba chica de paletas, como cebadora y de una bomba molecular Howleck o bien de una bomba de condensación a

vapor de mercurio, de la cual existen modelos poderosos, pero que necesitan un artificio de aire líquido a causa de la tensión del vapor de mercurio (10^{-3} mm). El considerable desarrollo industrial de los procedimientos por evaporación, fue el que dio la solución práctica del problema, perfeccionando las bombas a difusión de vapor de aceite especial (Amoil, Octoil, Silicone) de muy débil tensión de vapor, gran resistencia a la oxidación y al sobrecalentamiento. En los Estados Unidos se utilizan corrientemente bombas a difusión, metálicas, a vapor de aceite, capaces de absorber muchos metros cúbicos por segundo a 10^{-4} mm de mercurio, ¡haciendo posible el aluminizado continuo de hojas en rollos! Por otra parte, sabemos construir bombas a difusión de aceite enteramente en vidrio, de tres etapas y cuatro calderas ¡magníficos exponentes del arte del soplador de vidrio, capaces de bajar la presión residual a 10^{-8} mm de mercurio!

Para apreciar el valor del vacío hasta 10^{-3} mm, puede bastar un simple tubo de descarga alimentado por una pequeña bobina de inducción. Para medir un vacío más elevado es necesario emplear un medidor generalmente delicado y costoso (medidor de Mac Léod, de Pirani, o de ionización). Si la superficie del vidrio está perfectamente pulida y el aluminizado bien hecho, el resultado es impecable sin ningún pulido posterior de la capa y no puede detectarse una difusión sensible, cualquiera que sea el ángulo del examen. Por el contrario, las menores picaduras de gris, despreciadas o inadvertidas al final del pulido son puestas de manifiesto despiadadamente. Con frecuencia los ópticos negligentes experimentan sorpresas en este aspecto: ¿es preciso decirles que no debe culparse al aluminizado y que toda tentativa de obstruir los agujeros con una muñeca de gamuza sobre el reciente aluminizado tendría consecuencias desastrosas? Al principio la capa es muy débil; el menor frotamiento provoca innumerables rayas; hasta debe evitarse quitar el polvo con un pincel. Al contacto con el aire se forma lentamente una delgada película de óxido de aluminio transparente: la alúmina, que gracias a su gran dureza constituye una buena protección al cabo de 6 semanas. Existen muchos procedimientos para acelerar la formación de una película de alúmina o para aumentar considerablemente su espesor, al punto de ofrecer gran resistencia no solo a la abrasión sino también a las alteraciones químicas normales, incluyendo las provocadas por el aire salino. Lo más perfecto parece ser la oxidación anódica[11], que exige en todos los casos capas muy adheridas y de doble espesor.

Los defectos más frecuentes del aluminizado son debidos a veces a la evaporación en un vacío insuficiente (escape, imprevista salida de gas), de lo que resulta una capa amarillenta y aun negruzca. Aun cuando el defecto sea muy poco pronunciado, se perderá la reflexión de radiaciones de cortas longitudes de onda. Para descubrir este defecto, simplemente puede compararse una hoja de papel bien blanco con su imagen vista muy oblicuamente por medio del espejo, la cual debe parecer también blanca. A veces, impurezas dentro del aluminio o por contaminaciones grasas puestas en movimiento por la descarga de limpieza, provocan grandes puntos negros sobre la capa. Pero el fracaso más frecuente es debido a las imperfecciones de limpieza; cuando el espejo sale de la campana está casi siempre impecable, pero el defecto de limpieza provoca generalmente, dentro de las 48 horas y a menudo sólo al cabo de una semana, una cantidad de micro intumescencias en forma de calotas convexas de algunos micrones de diámetro, que son bastante densas en ciertas regiones como para difundir bastante más luz que las picaduras grises. En este caso hay que volver a aluminizar.

Transporte de espejos aluminizados

Para no complicar inútilmente el trabajo de aluminizado, debe enviarse dentro de lo posible, un espejo limpio y bien pulido. La limpieza de la cara óptica es asunto de la persona que hará el aluminizado, pero uno se preocupará de eliminar con bencina todo rastro de brea; el rojo del dorso del espejo y los cantos se limpiarán con un jabonado y un borrador de tinta. Las asperezas de estas superficies, a menudo muy rudimentariamente desbastadas, pueden retener mucha sustancia capaz de desprender gases e impedir el logro de un buen vacío. Como el tratamiento para endurecer el aluminio en general se evita y jamás se espera la formación natural de un espesor suficiente de alúmina, el embalaje para transporte del espejo debe prever además de la protección del espejo, la protección de la frágil capa de aluminio en el viaje de retorno. La figura 67 da un ejemplo de caja conveniente. El espejo colocado en una caja interior bien limpia y pintada con gomalaca, tiene su cara óptica separada del fondo por varios milímetros gracias a cuatro tacos en las esquinas que lo soportan por el borde; el aluminio no debe tocar con nada. Es de desear que esta caja interior sea hermética al polvo, lo cual puede lograrse con una banda de tira emplástica sobre la unión de la tapa. Todo embalaje que implique el contacto directo del aluminio con papel de seda o algodón hidrófilo, no es aconsejable debido a las posibles trazas de cloro en estas substancias. Para los envíos por ferrocarril se requiere además, otra caja exterior aproximadamente 5 cm mayor en todos los sentidos, para el cuidadoso centrado con manojos de viruta de madera.

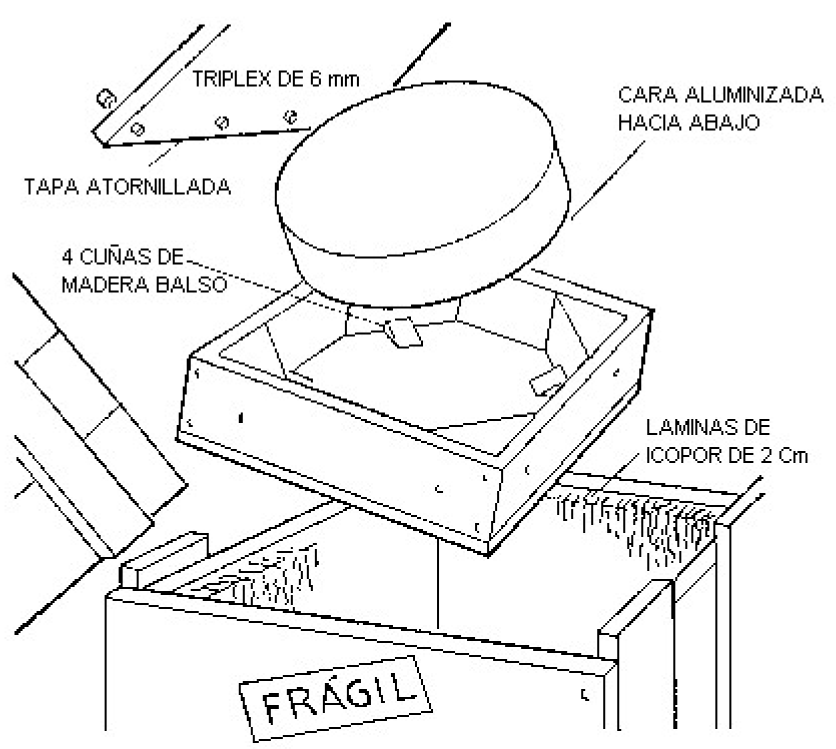


Fig 67. Doble embalaje para el transporte de espejos aluminizados

Cuidado del aluminizado

Aun después de las primeras seis semanas, es conveniente contentarse con una ligera limpieza con pincel y evitar especialmente todo frotamiento con un trapo o gamuza. Particularmente en el caso de un depósito de rocío o de vapor es necesario aguardar la evaporación después de la aclimatación del espejo sin tratar de frotar. El aluminizado resiste bastante bien la humedad, pero debe evitarse la repetición muy frecuente de un ciclo de condensaciones y evaporaciones, sobretodo en las cercanías del mar. El polvo es otra causa de destrucción; cuando el telescopio no se usa, una cubierta de vidrio que rodee el borde del espejo, constituye una buena protección; este medio es clásico para proteger los plateados; en el caso de un aluminizado uno se contenta frecuentemente, si el tubo del telescopio es completo, con una cubierta casi estanca en lo alto del tubo[12]. Es conveniente dejar el instrumento con el tubo horizontal para evitar el polvo graso más pesado, que el pincel no haría sino extender. Después de uno o dos años de servicio, la superficie está por lo general, notablemente manchada y difunde bastante luz. No obstante, el aluminio conserva su poder reflector y permanece utilizable después de un lavado del espejo en agua jabonosa;[13] se sumerge por completo el vidrio en el agua; se pasa ligeramente y sin insistir un trozo de algodón impregnado de jabón de tocador (sin soda libre que atacaría inmediatamente el aluminio); se enjuaga cuidadosamente toda traza de jabón con un nuevo algodón dentro de agua pura; es necesario secar rápidamente. Al precio de ciertos cuidados, un aluminizado puede rendir un buen servicio durante cinco años. El poder reflector se mantendrá elevado si el espesor original del aluminio era suficiente para conservar la opacidad no obstante la formación de una película de alúmina cada vez más gruesa; sin embargo los depósitos difusores acabarán por resultar molestos, si se desea un instrumento realmente de primer orden.

El centrado

El centrado de los espejos de un telescopio es una operación fácil que debe resultar familiar a quien lo utiliza. El dueño de un instrumento con tubo de madera expuesto a notables variaciones de grado higrométrico, no debe dudar en revisar periódicamente su centrado.

Por lo común, la operación se realiza en dos tiempos:

1. ***Un centrado preparatorio*** que puede hacerse en pleno día y en algunos minutos; es un simple centrado geométrico.
2. ***Un centrado exacto*** que consiste en buscar *empíricamente* la mejor imagen posible, observando una estrella con un ocular de foco muy corto.

Centrado preparatorio

El *centrado preparatorio* es extremadamente fácil; se dirige el telescopio con sus dos espejos metalizados y descubiertos sobre un fondo luminoso extenso y uniforme. Se mira a través del tubo portaocular después de haber quitado el ocular; se ve (figura 68, se describe de grande a pequeño) directamente el contorno exterior del espejo secundario diagonal que se proyecta bajo el aspecto de un círculo, de un octágono o de un cuadrado, poco importa; se ve también el contorno del espejo principal gracias a la reflexión sobre el secundario que, visto desde el plano focal, aparece un poco más pequeño que el espejo diagonal si este último es de dimensión bien calculada; por último, gracias a las dos reflexiones, se ve un tercer contorno mucho más pequeño, que es la imagen del espejo secundario plano que contiene la imagen del portaocular y la de nuestro ojo. Por lo común al comienzo, ambos espejos están muy descentrados. Se observa un aspecto parecido al de la figura 68A en la cual los tres contornos están netamente excéntricos. Se comienza por centrar el espejo secundario diagonal actuando sobre sus tornillos de centrado por encima de él, y girando el cuerpo que lo sostiene de modo de hacer concéntricas la imagen del espejo principal y el contorno del diagonal. El resultado obtenido es el que se representa en la figura 68B; para estar seguros de observar por el eje del portaocular, se puede montar provisionalmente un cuerpo de un ocular de foco muy corto, sin lentes. Los dos contornos observados son de diámetros poco diferentes y se tendrá una precisión suficiente sin accesorios, tanto más cuando en este momento un pequeño defecto de centrado del secundario no tendría gravedad (el campo de plena iluminación no estaría exactamente repartido en el campo del ocular). Observemos también que si el eje del portaocular, perpendicular al tubo por construcción, no visa exactamente el centro del diagonal como consecuencia de un error de instalación, se podrá centrar el telescopio, pero los oculares harán un pequeño ángulo con respecto al eje del haz. Algunas veces los portaoculares están provistos de tornillos calantes y resortes que permiten compensar esta inclinación, pero este dispositivo es un lujo que puede suprimirse. Los oculares ortoscópicos toleran un error de inclinación de varios grados sin inconvenientes, lo que representa un margen ampliamente suficiente para la colocación del portaocular.

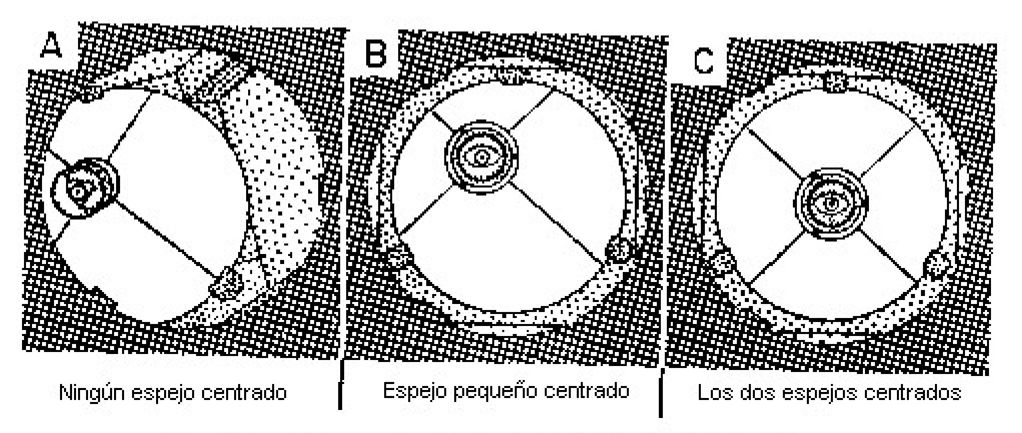


Fig 68. Centrado preparatorio en pleno día

Para el centrado preparatorio del espejo principal, consideremos ahora la pequeña imagen de la sombra del secundario, que es necesario centrar dentro del contorno de la imagen del espejo principal, actuando sobre los tornillos calantes (ref. 15, figura 57) del espejo. Si bien los diámetros de estos contornos son muy diferentes, tenemos la costumbre de evitar completamente todo el arsenal de diafragmas, pantallas y pequeños agujeritos descritos bajo diversas formas por muchos autores a los cuales remitimos al lector aficionado a los centrados geométricos[14]. Para nosotros, estos procedimientos tienen poco interés puesto que postulan implícitamente que el espejo principal es exactamente de revolución. Es preferible no hacer ninguna suposición y fiarse únicamente del centrado sobre una estrella, que eventualmente podrá conducir a adoptar expresamente una posición fuera de eje si el espejo principal es ligeramente astigmático, por ejemplo.

Centrado exacto

El *centrado exacto* con una estrella, requiere más atención; pero no hay que exagerar las dificultades. Para fijar ideas, observemos que el defecto de centrado que muestra una coma bien perceptible con un espejo a f/D = 6 corresponde a una separación de 2,3 mm en el plano focal, lo que representa, con nuestros tornillos calantes de paso 100, aproximadamente un tercio de vuelta; en las mejores condiciones de rotación de un décimo de vuelta produce un resultado perceptible. Se elige una estrella de 3ra ó 4ta magnitud (para un 200 mm) bien alta en el cielo para aumentar la posibilidad de tener buenas imágenes y evitar perder el contacto dorsal del espejo por un tornillo calante que habría entonces que destornillar (es preferible hacer los últimos ajustes atornillando los calantes). Como la inclinación del espejo principal todavía no es definitiva, el buscador no puede centrarse aún y, por lo tanto, no es utilizable; por consiguiente, es necesario primero emplear el ocular de foco más largo para hallar la estrella y colocarla en el centro del campo. La figura 69A presenta a título informativo un ejemplo de imagen compleja (combinación de coma, astigmatismo y difracción) que se observa lejos del eje de un espejo a f/D = 6. Pero aun el centrado preparatorio más torpe no dejará un descentrado tan considerable; pero de todos modos la coma domina e indica claramente en qué dirección se encuentra el eje, que está marcado sobre la figura. La parte superior de la figura 69 se refiere a manchas extrafocales

observadas algunos milímetros atrás del mejor foco con un ocular medio, que basta para notar la excentricidad de los anillos y comenzar la corrección. La orientación del penacho indica si es menester actuar sobre el tornillo calante superior o sobre uno de los laterales. Si se trabaja solo, en lugar de hacer un razonamiento que muy probablemente nos inducirá a error, es mejor y más rápido hacer una tentativa cualquiera (atornillar o destornillar) pero pensando bien en lo que se hace, y observar si la coma disminuye o aumenta. Cuando es posible obtener la ayuda de una persona que maneje los pernos de los tornillos de centrado, la operación es rápida; se dirige la maniobra de modo de ver la imagen desplazarse por el campo en el sentido de la coma (figura 69 abajo) y todavía podemos arreglarnos, al menos con un ocular no muy fuerte, para no perder la estrella del campo. Con un telescopio Cassegrain no muy grande, la operación es particularmente fácil, puesto que el mismo observador puede girar los tornillos calantes sin cesar de observar. Aproximándose al eje (figura 69B), el empleo de las manchas extrafocales con un ocular medio resulta un procedimiento no muy sensible y es preciso servirse del ocular más fuerte de que se disponga (3 mm) y visar la imagen focal exactamente puesta a foco cada vez. La figura 69B abajo, muestra la distribución desigual de la luz de los anillos de difracción en presencia de una débil coma (retocar aproximadamente con una media vuelta de tornillo) y en presencia de coma combinada con una flexión de simetría ternaria del espejo sobre sus tres tornillos calantes. Los últimos retoques se realizarán por un cuarto o un octavo de vuelta. Si se tiene la suerte de observar imágenes bastante calmas como para ver la imagen de difracción y los anillos de manera permanente, la operación es rápidamente concluida; en caso contrario, el pequeño defecto que podrá subsistir no será, a pesar de todo, perjudicial para las imágenes mediocres.

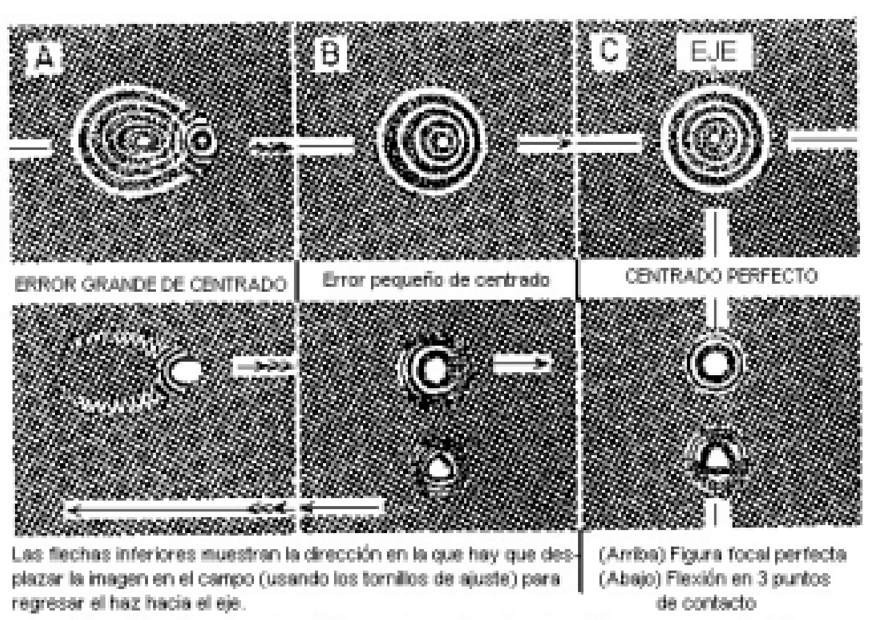


Fig 69. Centrado del espejo principal sobre una estrella

La figura 69C muestra un centrado perfecto; la figura inferior que se observa en presencia de flexión sobre los tres tornillos calantes muestra los anillos nudosos que se igualarán lo mejor posible en intensidad, desconfiando de la turbulencia, que produce aspectos análogos pero móviles.

No creemos necesario insistir; en el fondo, la operación es instintiva como lo es la puesta a foco, y es más fácil de hacer que de leer y comprender sobre la base de la mejor descripción.

[1] Amateur telescope making, 4a edición, págs. 397 – 428. Exposición muy detallada.

[2] L'Astronomie, t. 49, pág. 188.

[3] Probablemente debida a L. Foucault.

[4] L'Astronomie, t. 38, pág. 255.

[5] A. Danjon y A. Couder, Lunettes et télescopes (Anteojos y telescopios), § 118, pág. 551.

[6] Es necesario en consecuencia, lavar todos los recipientes con agua destilada antes de su empleo.

[7] ¡Las pieles de oveja que se venden, están adelgazadas con muelas de carborundum!

[8] En los Estados Unidos muchos aficionados aluminizan ellos mismos sus espejos. En Francia, además de los laboratorios del Institut d'Optique y del Institut d'Astrophysique, la mayoría de las grandes casas de óptica poseen su equipo para la metalización y fluoración y existen varias casas especializadas que tienen una técnica al día. Citamos: la Société d'Optique para el tránsito, 50 avenida Claude – Vellefaux, París (Xe), que ha aluminizado la mayor parte de los espejos de la Commission.

[9] J. Strong, (Solubilidad límite del tungsteno en los metales evaporados), y también (Aluminizado de los primeros grandes espejos astronómicos) vol. 46, págs. 18 – 26.

[10] Merigoux, Recherches sur la contamination du verre par les corps gras.

[11] Hass, Journal, Optical Society of America, tomo 39, No 7, págs. 532 – 540.

[12] Para el tubo de madera del telescopio estándar, se puede construir una tapa de madera con bordes que se pueda quitar y poner fácilmente.

[13] Evidentemente es preferible el empleo de un detergente totalmente neutro como alguno de los distintos compuestos sulfonados de uso doméstico.

[14] En la actualidad existen en el comercio colimadores a rayo laser que se insertan en el portaocular.

8. El instrumento en las condiciones reales de empleo

Dificultades de uso de un telescopio de mediana potencia

Somos ya los poseedores de un telescopio ópticamente irreprochable y bien centrado. ¿Vamos a obtener automáticamente las satisfacciones prometidas por el diámetro del objetivo? Ciertamente que no; la parte de trabajo que queda por hacer es la más difícil de aceptar y tanto más cuanto mayor es el diámetro del instrumento.

La técnica de la observación con un instrumento mediano merecería una larga exposición que no podemos pensar en incorporar a estas notas de constructor. Debe suponerse que quien usa un telescopio de 200 mm posee ya alguna experiencia como observador, adquirida más fácilmente con un pequeño anteojo. Apuntar el instrumento, ponerlo a foco, seguir el astro, evitar las vibraciones de la montura, elegir el ocular, tomar un croquis, adquirir una educación del ojo, son pequeños problemas simples que un poco de práctica permite dominar fácilmente. En tanto el instrumento es considerado como colector de luz, no existe gran dificultad en lograr el resultado esperado; por ejemplo, la observación de estrellas variables con aumentos relativamente débiles y la toma de fotografías en el foco newtoniano, son fácilmente realizables aun para las magnitudes límites que el espejo puede revelar. Las sorpresas llegan en el momento en que se quiere, además aprovechar todo el poder separador teórico del espejo; la observación de estrellas dobles muy próximas y todavía más, las tenues manchas planetarias, presentan dificultades que crecen rápidamente con la abertura. La gran fuente de disgustos a este respecto es lo que en conjunto se llama *turbulencia atmosférica* y puesto que esta cuestión atañe a la responsabilidad del constructor, no podemos ignorarla.

Hasta el momento hemos supuesto que las superficies de onda incidentes llegan al objetivo siendo planas; de hecho, antes de alcanzarnos, los rayos luminosos emitidos por una estrella deben atravesar la atmósfera, que está lejos de ser un medio ópticamente homogéneo; el aire caliente no tiene el mismo índice de refracción que el aire frío; las corrientes de aire a temperaturas diferentes deforman entonces de manera variable y compleja las superficies de onda transmitidas. Si suponemos que el telescopio abarca un haz de cierto ancho, la onda se presentará muy perturbada. Lord Rayleigh ha expresado con una fórmula cómoda[1] el desfasado δ producido en el aire sobre una longitud de *l* centímetros por una diferencia de tº C:

De este modo, para 0,56 μm puede resultar una diferencia de marcha de λ/4 para una diferencia térmica de solo 0,13º C en una longitud de un metro a nivel del mar. Lo asombroso es que todavía puede obtenerse al nivel del suelo una imagen útil con un haz de varios decímetros de diámetro. Normalmente, a gran altura, las anomalías son bastante grandes y superpuestas en espesor en número suficiente para dar en promedio una superficie de onda no muy deformada; por el contrario, los remolinos localizados cerca del instrumento que se elevan de todos los radiadores de calor comenzando por el mismo espejo al comienzo de la noche, son estrechos pero de fuerte pendiente; la superficie de onda es entonces deshecha y la imagen destruida. Se comprende la utilidad de distinguir entre los diferentes niveles de perturbación puesto que los más graves son también los más próximos a nosotros y debemos intentar hacer algo para anularlos.

No es posible tratar semejante tema con el mismo rigor que una cuestión cómoda como es la forma de un espejo; el error consistirá en creerlo menos importante por ser matemáticamente intrincado y sin “interés pedagógico”. Para el observador, no solamente la cuestión es “del programa”, sino que ella domina todas sus posibilidades. Insistiremos sobre esta cuestión puesto que frecuentemente escuchamos a los principiantes, que en apariencia son sicológicamente incapaces de situar la verdadera dificultad, atribuir sus disgustos a causas irrisoriamente secundarias como un pequeño defecto de parabolización o una deformación térmica de su espejo.

Clases de turbulencia

Únicamente por razones de comodidad de análisis distinguimos tres clases de turbulencia, aunque en realidad no existen transiciones bruscas entre ellas:

1. ***Turbulencia dentro del instrumento***. Apuntemos el telescopio sobre una estrella brillante o mejor sobre un planeta cuyo diámetro aparente sea con preferencia de 10 a 20’’. Retiremos el ocular y efectuemos la experiencia de **Foucault** utilizando a modo de hoja de cuchillo el borde de una tarjeta de visita apoyada sobre la montura del portaocular. Aun con una montura azimutal, basta un poco de práctica para bisectar la imagen durante uno o dos segundos y rectificar la puesta a punto de nuestro cuchillo según el sentido del desplazamiento de la sombra. En lugar de la extinción uniforme del espejo, que debería observarse como en el centro de curvatura de un esférico, se ven pasar frente al espejo sombras muy contrastadas producidas por vetas de aire ópticamente heterogéneo. En la figura 70 damos algunos ejemplos de posibles aspectos imitados en el laboratorio con un espejo esférico de taller de 300 mm de diámetro, 5.500 mm de radio de curvatura y que no tiene en sí más que defectos de 1 ó 2/100 de onda.

La fórmula Rayleigh muestra con claridad que no hay que esperar la obtención de imágenes completamente libres de perturbaciones. La figura 70A ilustra los remolinos débiles (aproximadamente $\lambda/10$), extensos y muy lentos que existen en un sótano; sería necesario un tiempo de exposición de varios minutos para integrarlos y revelar los defectos de forma reales del espejo.

Anomalías de este género apenas alteran la mancha de difracción de una estrella; únicamente se observan pequeños cambios de brillo sobre el primer anillo de difracción y deformaciones pasajeras del falso disco. Supongamos también que se espera conseguir una mayor homogeneidad, removiendo el aire cerca del espejo por medio de un ventilador. La figura 70B (ventilador de 20 cm de diámetro colocado a 60 cm a la izquierda del espejo) muestra el lamentable resultado obtenido: los rápidos remolinos rompen la onda en fragmentos de 5 a 6 cm, fuertemente inclinados; los desfasados son del orden de $\lambda/2$. La imagen de una estrella se altera considerablemente y la energía se distribuye en los primeros anillos de difracción, que se rompen en arcos móviles muy brillantes; no obstante, el falso disco permanece visible, pero la detección de un compañero débil resultaría muy difícil. Solamente para turbulencias dentro del tubo, que son todavía más graves, el ventilador podría mejorar las superficies de onda.

Las paredes del tubo del telescopio, muy largas en el sentido de los rayos incidentes, son la sede de intercambios térmicos que pueden resultar molestos. El aspecto fotográfico en la figura 70C corresponde a un tubo corto (10 cm) que sólo tenía 1 cm más que el diámetro del espejo y una temperatura 5º más elevada que la del aire ambiente. Se comprueba la formación de grandes remolinos de lentos desplazamientos que afectan a fracciones importantes de la superficie de onda; además, una envoltura de 3 cm de espesor rodea las paredes del tubo y produce en el borde derecho del espejo un desfasado sensiblemente superior a una franja. La imagen es ondulante pero continúa siendo utilizable

aunque desde luego, está afectada por la notable aberración zonal producida por la envoltura.

Efectos mucho más nefastos se observan en el interior de un tubo metálico muy estrecho; los remolinos son entonces rápidos y numerosos; la perturbación existe permanentemente en el borde de una pared metálica y para evitarla es necesario dar al tubo un diámetro 10 cm más grande que el del espejo. El tubo del telescopio estándar, no obstante su sección un poco justa, da buenos resultados, en parte debida a su forma cuadrada, pero sobre todo a causa de sus paneles de madera triplex que irradian muy poca energía. Efectos térmicos menos graves se observan en el borde de piezas metálicas inevitablemente interpuestas en el haz: la montura del espejo secundario y las láminas de soporte. El lector hallará en L'Astronomie[2] un artículo especial de A. Couder a este respecto.

La figura 70D muestra un ejemplo de enormes perturbaciones, extremadamente rápidas, muy estrechas y muy inclinadas, que existen a 50 cm por encima de la llama de una vela. Apenas hay necesidad de decir que la imagen de difracción se desvanece en una mancha 50 veces más grande, constituida por un enjambre de gusanos luminosos. No se requiere una destrucción tan completa de la imagen para impedir toda observación útil; vetas turbulentas, prácticamente tan perjudiciales, se elevan de las piezas metálicas de una montura ecuatorial, del suelo y del notable radiador que constituye el observador. Todos los talladores de espejos se han divertido examinando en el **Foucault** los remolinos que se elevan de la mano de una persona interpuesta en el haz cerca del espejo. Se comprende que un "tubo" armazón de metal estará prácticamente siempre recorrido por estos remolinos casi inevitables. Para dar buenos resultados, el armazón deberá tener una sección mucho más grande que el haz y estar provisto de un tubo interior completo, muy liviano y de material mal conductor (madera porosa como triplex, conglomerado, icopor, cartón ondulado, fibra de vidrio), para apartar del haz todos los remolinos exteriores y los emitidos por los largueros metálicos; también deberá ser hermético a las corrientes de aire, que deberán cuidarse especialmente del lado del espejo. El ideal consistiría en cerrar el orificio superior de este tubo con un vidrio estanco, hecho de vidrio de óptica de caras planas y paralelas[3]; la construcción de esta lámina, mucho más trabajosa que el espejo principal, no tendría nada de imposible para un aficionado experto, pero el simple gasto en vidrio de óptica de primera clase, sería ya considerable para un instrumento inferior a unos 30 cm, para el cual un tubo bien estudiado rinde resultados satisfactorios.

2. ***Turbulencia local***. Naturalmente, en la vecindad del instrumento y hasta varios centenares de metros existen fuentes de perturbación que no podemos apartar del haz. Sin embargo, también la respiración del observador puede ser apartada por un deflector liviano prolongado aproximadamente 40 cm del tubo propiamente dicho. Si el instrumento apunta un astro un poco elevado, la influencia del suelo se reduce rápidamente. El viento lateral, atacando oblicuamente la abertura del telescopio, produce por el contrario graves remolinos espirales particularmente marcados si el aire ha rozado un techo caliente. Las peores condiciones locales se encuentran dentro de una pieza de apartamento apuntando el instrumento a través de una ventana; aun después de un equilibrio térmico aproximado de la pieza, subsiste un régimen arremolinado irregular pero permanente que no deja gran esperanza de utilizar con provecho aumentos superiores a 100 ó 150. A pesar de todo,

aquellos que no puedan observar de otro modo no deben descorazonarse; con un poco de perseverancia encontrarán circunstancias favorables en ciertas épocas del año (por lo común en primavera en los países con estaciones) o hacia el final de la noche. Cuando el régimen térmico está invertido y el aire exterior es más cálido que el interior[4], es posible obtener buenas imágenes. Si no fuera así, casi todos los instrumentos astronómicos colocados bajo una cúpula serían inutilizables para los trabajos que requieren un gran poder de resolución. Al aire libre las condiciones generalmente son mejores; hay que evitar las terrazas de cemento armado, muy grandes, expuestas al sol durante el día, los muros, y de modo general todos los radiadores próximos de gran capacidad térmica. La configuración del terreno es también importante; el aire se eleva según las líneas de convección; las posiciones en lugares cortados a pico y con la visual parcialmente obstruida por una colina son *a priori* desfavorables; no obstante, no existen reglas absolutas; la experiencia es la que decide en todos los casos. El aire cálido o enfriado que circula cerca de una fuente alejada, produce aspectos fáciles de confundir con la turbulencia de grandes alturas; la prueba de **Foucault** no muestra remolinos netos relativamente lentos, sino fluctuaciones locales grandes y muy rápidas para ser interpretadas por la observación directa. No es posible enfocar el ocular sobre estos remolinos como puede hacerse en el caso de la turbulencia de altura. Para nosotros las mejores condiciones locales (la elección del lugar geográfico es otra cosa) se lograrán en terreno llano con suelo cubierto de césped, el instrumento montado sobre un pilar a varios metros de altura, la tarima de observación soportada por una ligera armazón de madera, el abrigo sostenido por la misma armazón mucho más grande y más alta que el instrumento, tabique y techo de doble pared y techo corredizo hacia el norte[5]. Las cúpulas mejores tienen igualmente tabiques caloríficos, un diámetro muy grande con relación al volumen del instrumento y una gran ventana que puede esperarse desprovista de grandes remolinos en la mitad central.

3. ***Turbulencia a gran altura***. El tema es importante, pero escapa a nuestro dominio. Especialmente, trataremos de distinguir esta fuente de perturbación de las precedentes. Cuando el nivel de la capa turbulenta está a varios kilómetros de distancia, las modificaciones de inclinación del orden del segundo de arco pueden traducirse para el observador por desviaciones laterales del orden del decímetro. A ojo desnudo el observador no recibe siempre la misma energía, ve la estrella titilar y este titileo es una indicación de turbulencia a gran altura cuando ninguna fuente terrestre alejada puede intervenir, como en el caso de una estrella un poco alta. Utilizando un haz un poco más ancho que el ojo, las fluctuaciones de la energía total admitida están muy atenuadas, pero se observan variaciones de brillo locales sobre la superficie de la onda; éstas son las *sombras volantes*. Basta dirigir el telescopio sobre una estrella brillante (no un planeta), retirar el ocular y colocar el ojo cerca del foco acomodándolo sobre la superficie del espejo como para hacer la prueba de **Foucault**, pero sin emplear la hoja de cuchillo. Se ven desfilar rápidamente estrías más o menos anchas, casi periódicas (de 5 a 10 cm por lo común), débilmente contrastadas si las circunstancias no son excepcionalmente malas; con frecuencia dos sistemas superpuestos en espesor tienen direcciones distintas. El lector interesado se remitirá con provecho a un reciente estudio de Gaviola, que incluye fotografías de estos aspectos[6]; este análisis da una nueva explicación ingeniosa de las alteraciones de la mancha de difracción con gran parte de la energía proyectada a los trozos de los primeros anillos; explicación que tiene en cuenta las propiedades de red de fase que constituye una superficie de onda perturbada por estrías.

Tomemos un ocular mediano y observemos el limbo lunar. Enfoquémoslo cuidadosamente sobre los detalles topográficos de la Luna: el borde del limbo nos parecerá ondulante; tiremos el ocular hacia afuera: las ondulaciones nos parecerán más netas y mejor contrastadas; dicho brevemente, pueden enfocarse, (en la medida en que esto tiene sentido) sobre la capa turbulenta. Conocidas las diferencias de enfoque de longitud focal del objetivo es fácil calcular la distancia de la capa turbulenta; se le encuentra por lo común a 3 ó 4 Km. El único remedio contra la turbulencia atmosférica, generalmente impracticable para el aficionado, es el de emigrar a un lugar privilegiado; las planicies elevadas semidesérticas (Flagstaff) o a veces un pico aislado (Pic du Midi, Mount Hamilton) son los lugares más reputados.

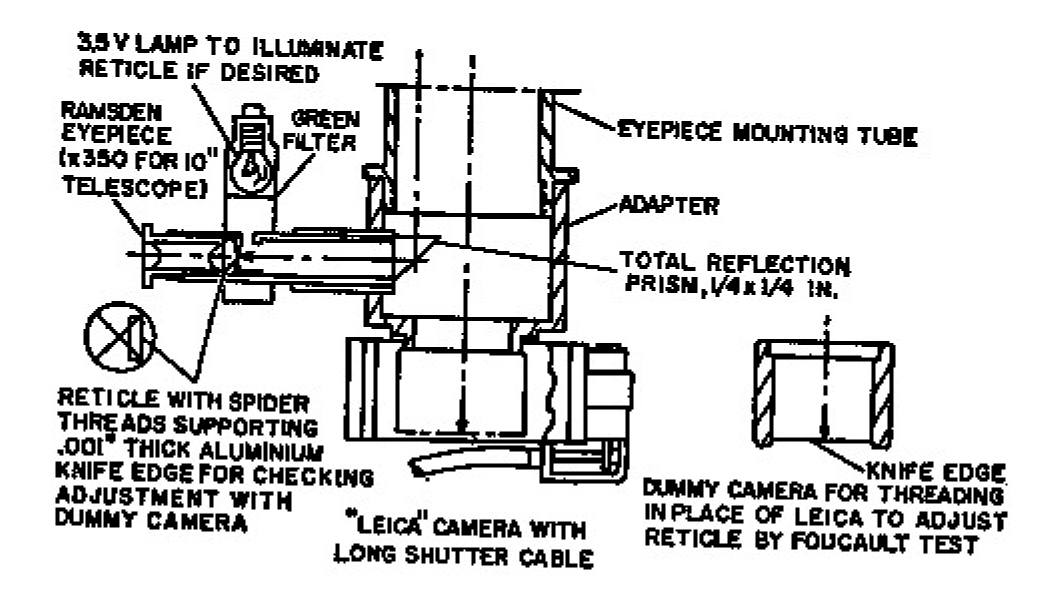


Fig. 71. Montaje para camara Leica para foco Cassegrain

Conclusión

No deseamos terminar estas consideraciones con una nota pesimista injustificada. Por de pronto, los resultados obtenidos por más de 150 colegas con sus telescopios estándar, muestran que un 20 cm es relativamente fácil de aprovechar seriamente en las más diversas condiciones.

Por sobre todo, hemos deseado evitar desilusiones a aquellos que construyen de primera intención telescopios de más de 30 cm de abertura, y procurando ayudarles a lograr al menos una fracción respetable del poder separador; por ello no hemos limitado el papel del constructor, a resolver cuestiones fáciles como es el tallado de un espejo parabólico. Es necesario entender que una sola ejecución de un hermoso instrumento queda desprovista de significado si no se es capaz de extraer resultados en relación al cuadrado del diámetro del espejo. El observador que se limite a comprobar que la imagen está agitada, estará derrotado de antemano. En cambio, si la experiencia ganada durante la construcción de su telescopio, agrega luego un estudio sistemático de los factores que gobiernan su uso, llegará a dominar el instrumento y las condiciones y circunstancias que encuadran sus observaciones.

[1] Scientific Papers, vol. III, pág. 102.

[2] L'Astronomie, tomo 63, pág. 253

[3] De hecho, los telescopios comerciales tipo Smith Cassegrain y Maksutov Cassegrain cumplen con esto, pero son mucho más costosos que los newtonianos.

[4] Cuando se saca el instrumento de una habitación con aire acondicionado al exterior más frío y húmedo, se forma sobre las superficies ópticas una capa de rocío que puede demorar hasta media hora en desaparecer. Para remediarlo, el telescopio debe permanecer en una habitación a la misma temperatura exterior, o sacarlo del aire acondicionado con suficiente tiempo de anticipación a la observación. Los proveedores de partes para telescopio ofrecen dispositivos para calentar eléctricamente la parte húmeda, denominados "dew remover".

[5] Se refiere a las horas de insolación; en el hemisferio norte hacia el norte, en el sur hacia el sur, y en nuestra zona tórrida, hacia el lado contrario de donde se encuentre el sol al medio día durante el año.

[6] E. Gaviola, On seeing fine structure of stellar images and inversion stellar spectra (Sobre visión. Estructura fina de las imágenes estelares e inversión del espectro estelar), Astronomical Journal, tomo 54, No. 1.178.